INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**



SOVIETICOS EN EL ESPACIO

Abril 1989
500 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Abril de 1989 Número 151


10 

La aventura espacial soviética
Peter M. Banks y Sally K. Ride

Desde 1977, la Unión Soviética ha mantenido una presencia continua en el espacio, con un programa de estaciones que absorbe sólo el 15 por ciento de su capacidad y que lleva a cabo sin especiales dificultades logísticas. La introducción de la lanzadera y del cohete Energiya induce a sospechar la existencia de proyectos más ambiciosos.

20 

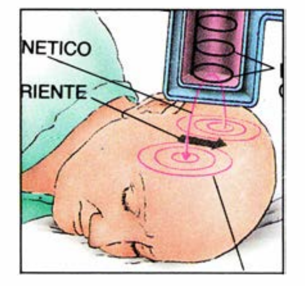
Genes para ver los colores
Jeremy Nathans

Tres siglos de experimentación en óptica, biofísica y bioquímica han permitido establecer la dependencia entre la visión de los colores y los pigmentos de las células coniformes de la retina. El autor ha aislado los genes responsables de la síntesis de los pigmentos y ha identificado las anomalías genéticas que determinan la ceguera a los colores.

30 

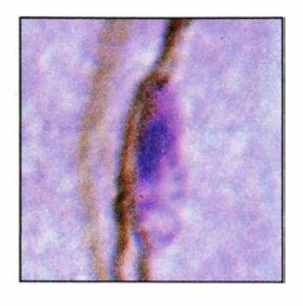
Gigantescas cataratas oceánicas
John A. Whitehead

Las cascadas más imponentes de la Tierra no son los saltos famosos, sino las corrientes invisibles de las profundidades oceánicas. Impulsadas por diferencias de temperatura o de salinidad, estas cataratas transportan hasta cinco millones de metros cúbicos de agua por segundo con un desnivel que supera los tres kilómetros. Determinan, además, el clima de los océanos.

50 

Aplicaciones futuras de los nuevos superconductores
Alan M. Wolsky, Robert F. Giese y Edward J. Daniels

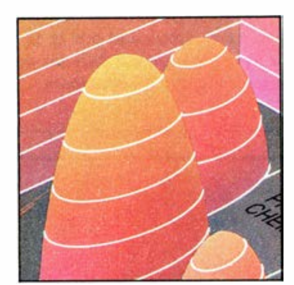
¿Habrá que esperar hasta la próxima década para aplicar los superconductores de altas temperaturas? Eso se infiere de su estado actual de desarrollo, mientras se acotan los campos posibles de su destino: no tanto la industria de la energía eléctrica o del transporte, cuanto dispositivos y componentes industriales, electrónicos y médicos.

60 

Del canto de los pájaros a la neurogénesis
Fernando Nottebohm

Dice una vieja creencia muy arraigada aún en neurobiología que, cuando las neuronas del cerebro de un vertebrado mueren, no se substituyen por otras nuevas. Pero hay motivos para opinar lo contrario. Cuando el canario adulto necesita aprender nuevas canciones, genera neuronas nuevas. Ese descubrimiento podría encauzar la futura terapia cerebral.

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

68 

Los efectos químicos de los ultrasonidos
Kenneth S. Suslick

La exposición de un líquido a ondas sonoras intensas produce cavitación. En virtud de ese proceso se forman burbujas microscópicas que implosionan de manera brusca y violenta. Los ultrasonidos proporcionan a los químicos una nueva fuente de energía para llevar a cabo las reacciones que se utilizan para producir nuevos compuestos.

76 

Dientes y prehistoria en Asia y América
Christy G. Turner II

¿De dónde provienen los pueblos de Asia oriental, la Polinesia y ambos continentes americanos? El análisis de los caracteres dentales revela que, hace más de 20.000 años, se formaron dos grandes grupos demográficos en el sureste asiático. Uno de ellos atravesó el puente de Bering hacia Norteamérica y de allí, a través del continente americano, hasta Chile.

84 

Metabolismo fotosintético del carbono en plantas superiores
Daniel H. González, Alberto A. Iglesias, Florencio E. Podestá y Carlos S. Andreo

La fijación fotosintética del CO_2 constituye uno de los procesos biológicos más importantes para la vida. Algunas plantas superiores han desarrollado rutas metabólicas auxiliares. El conocimiento de tales rutas plantea la posibilidad de incrementar el rendimiento de cultivos.

SECCIONES

6 

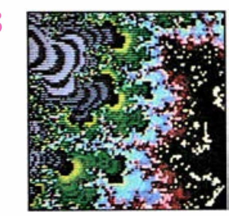
Hace...

Doscientos años nace Agustín Yáñez y Girona, naturalista.

40 **Ciencia y sociedad**

46 **Ciencia y empresa**

94 **Taller y laboratorio**

98 

Juegos de ordenador

A bordo del Mandelbús en un viaje imaginario por el conjunto de Mandelbrot

104 **Libros**

112 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Josep Enric Llebot: *La aventura espacial soviética*; Santiago Torres: *Genes para ver los colores*; Manuel Puigcerver: *Gigantescas cataratas oceánicas*; Juan P. Adrados: *Aplicaciones futuras de los nuevos superconductores*; Ramón Guardans Cambó: *Del canto de los pájaros a la neurogénesis*; Amando García: *Los efectos químicos de los ultrasonidos*; Yolanda Fernandez Jalvo: *Dientes y prehistoria en Asia y América*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Nicolás García Tapia, Mariano Artigas, Francesc Artigas y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
11	Tass/Sovfoto
12-16	Ian Worpole
17	Australian Department of Defense
21	Bruce Coleman Inc./Nicholas deVore III
22-27	George V. Kelvin
31	Robert Frazel, Institución Oceanográfica Woods Hole
32-36	George Retseck
37	Robert Frazel, Institución Oceanográfica Woods Hole
51	S. Varnedoe
52-53	Thomas C. Moore
54	Johnny Johnson
55-56	Thomas C. Moore
57	Laboratorio nac. de Argonne
58	Laboratorios AT&T Bell
61	Fernando Nottebohm
62-65	Patricia J. Wynne
69	Lawrence A. Crum, Universidad de Missisippi
70-73	Andrew Christie
74	Dominick J. Casadonte y Frank J. Scheltens, Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (*arriba*); Stephen J. Doktycz, Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (*abajo*)
77	Christy G. Turner II
78	Christy G. Turner II (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
79	Christy G. Turner II (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
80-81	Tom Prentiss
82	Christy G. Turner II (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
85	Daniel H. González *et al.*
86-90	Daniel H. González *et al.* y Ricardo Génova
91	Daniel H. González *et al.*
94-97	Michael Goodman
98	Edward Bell
99	Walter S. Strickler (*arriba, izquierda*), John Dewey Jones (*arriba, derecha*), Andrew LaMance (*abajo, izquierda*), Ken Philip (*abajo, derecha*)
100	Michael Adler (*izquierda*), R. Terry Sproat y Rick McCauley (*derecha*)
101	James L. Crum



EL DIBUJO DE LA PORTADA muestra la lanzadera espacial soviética *Buran* en el momento de ser lanzada al espacio mediante el sistemas propulsor de mayor potencia de la URSS, el cohete Energiya (véase "La aventura espacial soviética" por Peter M. Banks y Sally K. Ride, en este número). La lanzadera soviética, que realizó su primer vuelo el mes de noviembre de 1988, presenta una estampa similar a la lanzadera estadounidense, aunque aquélla puede pilotarse automáticamente. El programa espacial soviético se ha caracterizado por la flexibilidad con que ha ido introduciendo distintas actividades humanas en los viajes y las estaciones.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3° 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace…

José M.ª López Piñero

…doscientos años

Nació en Barcelona Agustín Yáñez y Girona, el autor de mayor influencia en la enseñanza de la historia natural en la España de la primera mitad del siglo pasado.

Tras realizar los estudios secundarios en el Seminario Conciliar de su ciudad natal, Yáñez se formó durante los años inmediatamente anteriores a la Guerra de la Independencia en varias de las notables instituciones científicas que la Ilustración había fundado en Barcelona. Entre otras enseñanzas, asistió a los cursos de física, química y botánica que se impartían en el Colegio de Cirugía, así como a las lecciones de Francisco Carbonell y Bravo en la cátedra de química aplicada creada por la Real Junta de Comercio.

Al terminar la contienda se hizo cargo interinamente de dicha cátedra de química aplicada hasta el regreso del exilio de Carbonell en 1816, al mismo tiempo que asistía a las lecciones de física de Pedro Vieta y a las de botánica que daba Juan Francisco Bahí y Fonseca. El año 1815, cuando aún no había obtenido ninguna titulación académica, ingresó como numerario en la Real Academia de Ciencias y Artes, otra destacada institución ilustrada barcelonesa que se convirtió a partir de entonces en uno de los escenarios centrales de su actividad. Desde el mes siguiente a su nombramiento como académico hasta su fallecimiento en 1857, Agustín Yáñez y Girona presentó una larga serie de trabajos y memorias, que fue recogiendo el *Boletín* de la institución, al principio relativos a cuestiones de química aplicada y, más tarde, mayoritariamente dedicados a temas de geología, mineralogía y otros aspectos de la historia natural.

Recuperando el tiempo que había perdido a causa de la guerra, Yáñez obtuvo en 1816 el título de bachiller en farmacia en el Colegio de San Victoriano, que había empezado a funcionar en Barcelona. Para poder concurrir a las oposiciones a cátedras de dicho Colegio consiguió poco después los grados de licenciado y doctor, siendo en Madrid discípulo, entre otras figuras, del gran botánico Mariano Lagasca. Ganó finalmente las oposiciones a la cátedra de historia natural, a la que dedicó sus más ilusionados esfuerzos. Como muchos otros profesores de ideas liberales, fue separado de la misma en 1823 por la reacción absolutista, no siendo repuesto en ella hasta 1830. Las posteriores reformas educativas le adscribieron algo más tarde al claustro de la Facultad de Ciencias Médicas de la restablecida Universidad de Barcelona.

Junto a los trabajos y memorias que, como hemos dicho, presentó a la Academia de Ciencias y Artes, Yáñez publicó numerosos artículos en *El Restaurador Farmacéutico*, principal revista sobre la materia en la España isabelina. No obstante, su aportación más difundida e influyente fue su manual de historia natural, auténtico hito en la enseñanza de esta disciplina en España. Una primera versión, aparecida a comienzos del trienio liberal en un solo volumen con el título de *Lecciones de Historia Natural* (1820), recogió la experiencia que había adquirido durante sus primeros años de catedrático. La versión definitiva se editó en 1844-1845 y, aunque mantuvo el título original, es una amplia síntesis didáctica en tres volúmenes. Como ejemplo de su contenido reproducimos a continuación unos fragmentos relativos al concepto de historia natural y a los sistemas de clasificación:

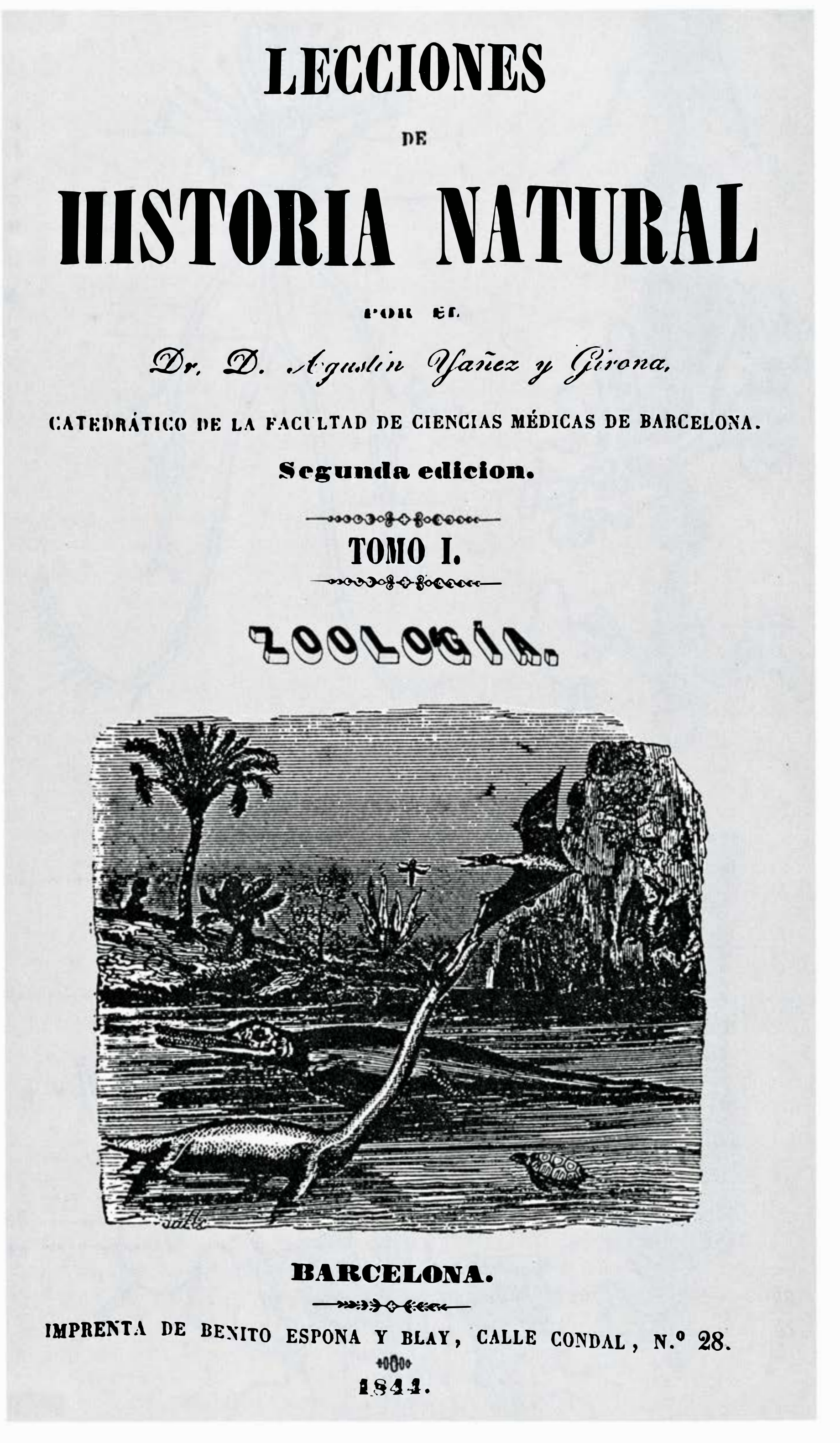
"La Historia Natural es la ciencia que tiene por objeto reconocer y distinguir, clasificar y describir los seres naturales. Limítase a los que componen el globo terráqueo, ya que no nos es dado alcanzar individualmente a los que forman las otras masas grandes que están diseminadas en el espacio. Para reconocer y distinguir los seres, se vale de *caracteres* que existen en unos, faltan en otros y presentan en muchos de ellos diferentes modificaciones. Para clasificarlos o reunirlos en grupos subordinados unos a otros que faciliten su estudio, apela a los *caracteres*, cuyo diverso grado de importancia evalúa, para sacar de su comparación los medios de señalar los varios puntos de identidad, analogía o distancia respectiva de los mismos seres. Para describirlos finalmente, no hace más que recorrer y explicar los expresados *caracteres*, cuyo conjunto hace formar la idea exacta de los objetos descritos. Infiérese de ahí que el estudio de los *caracteres* es la primera ocupación de los que se dedican a la Historia Natural…

"Dijimos que uno de los objetos de la Historia Natural era clasificar los seres, o sea reunirlos en grupos subordinados unos a otros que faciliten su estudio. Si se tratase de un corto número de objetos, no habría necesidad de clasificarlos; pero las producciones de la naturaleza son tan variadas, que se hace precisa una colocación metódica de las mismas, sin la cual todo sería confusión; del propio modo que sucede cuando tenemos confiado un cúmulo de negocios, papeles o cualesquiera otros asuntos que necesariamente debemos ordenar para desempeñarlos. En tanto son indispensables las clasificaciones en nuestra ciencia, cuanto sus más acérrimos enemigos han adoptado la suya, a lo menos tácitamente, al ordenar los seres de que han tratado. Ellas son un medio con que suplimos la falta de nuestra inteligencia, una prueba de los recursos con que contamos y un expediente que vuelve asequible y aún fácil lo que sin su auxilio sería sumamente difícil o casi imposible. A proporción que nos internemos en el estudio de la naturaleza, hallaremos ejemplos cada vez más convincentes de estas verdades. Las clasificaciones de los naturalistas consisten en la reunión de los seres en grupos, de éstos en otros más universales, y así sucesivamente; son un edificio intelectual producido por abstracciones graduadas, cuyas partes cada vez más universales contienen las anteriores y son contenidas en las siguientes; se parecen a un catálogo razonado, en el que están colocados los objetos bajo un cierto orden y distribuidos en capítulos, que se subdividen en artículos, párrafos, etc. Dichos grupos se llaman *especies, géneros, familias, órdenes, clases, etc.*, y su conjunto *sistema* o *método*. La es-

pecie, por ejemplo, es una reunión de seres que se parecen entre sí más que con ningún otro; géneros son la reunión de especies que tienen más semejanza; familias la reunión de géneros bajo los mismos principios, y así en adelante. Este es el modo sintético de considerar los sistemas, procediendo de los seres a los grupos cada vez más universales y aplicando en consecuencia grados correspondientes de abstracción. La idea de la especie, v. g., comprende todos los caracteres en que se parecen los seres incluidos en ella, haciendo abstracción de los caracteres restantes; la del género, que abraza diferentes especies, sólo incluye las notas en que estas especies se asemejan, prescindiendo de las que no pertenecen más que a cada especie, y por lo mismo exige una segunda abstracción; y lo propio sucede al ir formando los grupos superiores. En una palabra, a proporción que formamos los grupos de más alta categoría, obtenemos ideas cada vez más universales o de *mayor extensión*, pero que constan de menor número de notas o son de *menor comprensión*.

"Construido ya el edificio, debemos considerarle en el sentido inverso, esto es, procediendo de todo el conjunto a las partes en que sucesivamente se divide. Así cada uno de los reinos es un grupo muy universal, que abraza gran número de seres y consta de pocas notas para su reconocimiento; la clase es una subdivisión del reino y abraza por lo mismo un número menor de seres que él, mas a los caracteres empleados para formar la idea del reino, tienen que añadirse otros para constituir la idea de la clase, de suerte que mientras al bajar de lo más a lo menos universal, aumentamos la comprensión de las ideas, disminuimos su extensión; y así por grados, descendiendo a los órdenes, etc. Tal es el mecanismo de este armazón de grupos subordinados unos a otros, que hemos denominado sistema o método.

"Desde luego atinará cualquiera que en cada ramo de la Historia Natural pueden existir muchos de los expresados sistemas; y esto es, en efecto, lo que ha sucedido, porque la mayor parte de los escritores se han creído autorizados para establecer los nuevos o reformar los admitidos. Se han dividido en *naturales* y *artificiales*. Estos últimos tienen por objeto dar a conocer los seres en virtud de caracteres suficientes que los distinguen unos de otros; sus autores tienen la libertad de escoger cualesquiera circunstancias convenientes para cumplir dicho objeto, y de ahí el gran número de los que se han admitido, como que si quisiéramos dar una reseña de ellos, tendríamos que clasificar las mismas clasificaciones. El estudio de un corto número de caracteres basta para entenderlas y aplicarlas; y el que se ha limitado a la práctica de cualquiera de ellas, sólo posee conocimientos muy superficiales de los seres clasificados. Al contrario, los sistemas o métodos llamados naturales, aunque verdaderamente artificiales porque son obra nuestra, estriban en


LECCIONES

DE

HISTORIA NATURAL

POR EL

Dr. D. Agustín Yañez y Girona,

CATEDRÁTICO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS MÉDICAS DE BARCELONA.

Segunda edicion.

TOMO I.

ZOOLOGÍA.

BARCELONA.

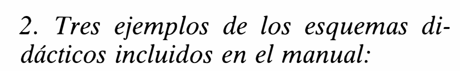
IMPRENTA DE BENITO ESPONA Y BLAY, CALLE CONDAL, N.° 28.

1844.

1. Portada del volumen primero de la versión definitiva del manual de Yáñez y Girona, importante hito en la enseñanza de la historia natural en España.

fundamentos más sólidos y requieren conocimientos más profundos; no hay más que uno en cada ramo de la ciencia, que es el objeto a que tienden los esfuerzos de todos los que la cultivan, y si hay alguna divergencia entre los autores, es porque en determinados puntos hay todavía por parte nuestra alguna oscuridad. Están fundados en dos bases llamadas *afinidades naturales* y *subordinación de caracteres*, las que suponen el estudio detallado de todos los puntos de vista bajo los cuales se pueden considerar los objetos. Los grupos están formados por la semejanza respectiva, no sólo en el mayor número de caracteres, sino también en los de más valor e importancia, por manera que la colocación de los seres en distintos grupos, y la de éstos en los más universales, señalan exactamente los diversos grados de afinidad que tienen entre sí y de la distancia a que se hallan unos de otros. El que sabe aplicar con precisión uno de dichos sistemas, da una prueba positiva de sus conocimientos profundos en el ramo.

"En todos los sistemas, la idea de la especie o primer grupo es invariable e independiente de la base que se ha adoptado para la clasificación. En el



2. Tres ejemplos de los esquemas didácticos incluidos en el manual:
2a. Tubo digestivo de los insectos.
2b. Sistema nervioso de los cefalópodos: –a *collar nervioso que abraza el esófago, cuyo trayecto está indicado por la línea* s*;* –c *masa nerviosa situada delante del esófago y llamada cerebro por algunos, cuya superficie superior remata en un tubérculo grueso de figura acorazonada y da en su parte anterior dos nervios terminados en un ganglio circular, del cual se origina otro par de nervios que pasan por debajo de la boca, abrazando de nuevo al esófago y formando un pequeño ganglio anterior origen de los nervios labiales;* –b *nervios tentaculares, de los que nacen los de los brazos;* –o *nervios ópticos que proceden de las partes laterales del cerebro y luego se hinchan, constituyendo un ganglio grueso;* –t *tubérculos nerviosos pequeños situados en el origen de los nervios ópticos;* –g *ganglio sub-esofágico o ventral;* –v *gran nervio de las vísceras, cuyas ramas presentan un ganglio oblongo* r*, y penetran en las branquias;* –m *nervios que nacen también de los ganglios post-esofágicos y tienen en su trayecto un ganglio grueso estrellado* e*, cuyas ramas se distribuyen en el manto.*
2c. Organos circulatorios y respiratorios de los cefalópodos: –c *corazón aórtico, cuyo extremo se continúa con la aorta superior que distribuye la sangre a la cabeza, etc.;* –b *ramas del mismo vaso;* –a *aorta inferior que presenta un bulbo en su origen y se divide desde luego en dos ramas* vv, vv*;* –vc *vena cava, cuyas paredes están cubiertas por los cuerpos esponjosos* cs*;* –av *venas de las vísceras que desembocan en las ramas de la vena cava;* –cb *senos venosos o corazones branquiales;* –br *branquias;* –ab *arteria branquial;* –vb *vena branquial;* –bu *bulbo de las venas branquiales, situado cerca del remate de ellas en el corazón.*

reino inorgánico se funda esta idea en la composición química, como explicaremos a su tiempo. En los dos reinos orgánicos poca aplicación tiene dicho principio, pues todos los seres y todas sus partes constan casi de unos mismos elementos en proporciones a veces poco variadas; la idea de la especie estriba en la identidad o semejanza de la estructura orgánica y funciones, no menos que en la serie sucesiva de seres que proceden unos de otros por generación sin cambios notables, y que por lo mismo pueden considerarse como descendientes de uno solo o de dos individuos. Esta idea, tan exacta en teoría como bien reconocida hasta el vulgo en muchos casos, no deja de presentar algunas dificultades en la práctica por un efecto de nuestra limitación y atraso en algunos puntos. Las diferencias que nos ofrecen los seres de la misma especie son puramente individuales o se extienden de una manera fija a un número considerable de individuos; en este último caso se llaman *variedades* o *razas*. En el reino inorgánico son más numerosas las variedades en los minerales más abundantemente diseminados en el globo, y dependen de las circunstancias exteriores que modificaron la atracción de sus moléculas constitutivas o integrantes. En los reinos orgánicos se producen las razas por causas que ejercen un poderoso influjo en la organización de la especie y se transmiten de generación en generación; las variedades son menos notables, menos permanentes, y se deben por lo mismo a causas de menos importancia; unas y otras son más comunes en las especies que están más inmediatamente bajo nuestro dominio, como son los animales domésticos y las plantas cultivadas, porque nosotros variamos indefinidamente o conservamos con puntualidad las circunstancias de que proceden.

"Hay a veces necesidad de interponer grupos entre los que llevamos descritos; dichas divisiones intermedias llevan el nombre de *secciones* entre los géneros y especies, *tribus* entre las familias y los géneros, etc., cuando están fundadas proporcionalmente en los mismos principios que los demás del sistema. Pero si los grupos intermedios se establecen sólo para comodidad y provisionalmente, no llevan nombre propio, señalándose sólo con una cruz, una estrella o cualquiera otra nota semejante, o se denominan *sub-clases, sub-órdenes, sub-géneros*, etc., con lo que se indica su colocación subalterna a las clases, órdenes, etc. Estos principios generales pueden servir para cualquiera de los tres ramos...".

La aventura espacial soviética

Desde 1971, los cosmonautas han permanecido a bordo de naves espaciales rusas, en total, más de 5600 días. Sin embargo, los vuelos tripulados representan sólo una pequeña parte del programa espacial que desarrollan los soviéticos

Peter M. Banks y Sally K. Ride

El pasado mes de noviembre, la Unión Soviética lanzó desde el cosmódromo Baikonur, cerca de Tyuratam, la lanzadera espacial *Buran* (tormenta de nieve, en ruso), impulsada por el mayor cohete construido hasta el momento. El ingenio dio dos vueltas completas a la Tierra y entró de nuevo en la atmósfera terrestre, aterrizando en algún lugar de la estepa centro-asiática con una maniobra automática y perfecta. Aunque la lanzadera iba sin tripulación y no transportó satélites, ni realizó ningún experimento, su breve vuelo inicial constituyó un resonante éxito tecnológico.

El vuelo de la lanzadera *Buran* supuso el lanzamiento espacial soviético número 77 del año 1988. La puesta en órbita del vehículo, inicialmente programada para el 29 de octubre, fue abortada cuando faltaban 51 segundos para el lanzamiento, al fallar el mecanismo retractor de una barra de acceso de la plataforma de lanzamiento. Durante las tres semanas siguientes, mientras los ingenieros preparaban la nave para un segundo intento de lanzamiento, las actividades soviéticas en el espacio continuaban. La estación espacial *Mir* dio 330 vueltas a la Tierra, sus cosmonautas establecían un nuevo récord de permanenecia en el espacio, 326 días, y la nave automática *Phobos* se aproximaba a Marte.

La lanzadera *Buran* y su enorme cohete propulsor Energiya representan las últimas incorporaciones en el amplio y diversificado programa espacial soviético, que desde 1971 ha puesto en órbita con éxito ocho estaciones orbitales y ha mantenido una presencia regular en el espacio durante los 12 últimos años, sin apenas solución de continuidad. Aunque impresionantes, estos logros corresponden sólo a una pequeña parte del esfuerzo espacial ruso.

A lo largo de las tres últimas décadas, los soviéticos han construido la infraestructura y han asegurado la presencia humana en el espacio. Se han basado en técnicas preexistentes, aunque con un enfoque abierto. Sólo ahora empieza a apreciarse en Occidente la magnitud y el alcance de su programa.

Antes de 1985, cuanto sabíamos del programa espacial soviético provenía de un arduo trabajo de investigación, casi detectivesco, llevado a cabo por un pequeño grupo de observadores europeos y norteamericanos. Las fuentes oficiales apenas suministraban información. Los soviéticos eran reticentes a difundir sus actividades y la administración norteamericana debía recurrir a sus propios canales de información. El resultado era un estado de ignorancia general sobre los avances de los soviéticos en ciencia espacial.

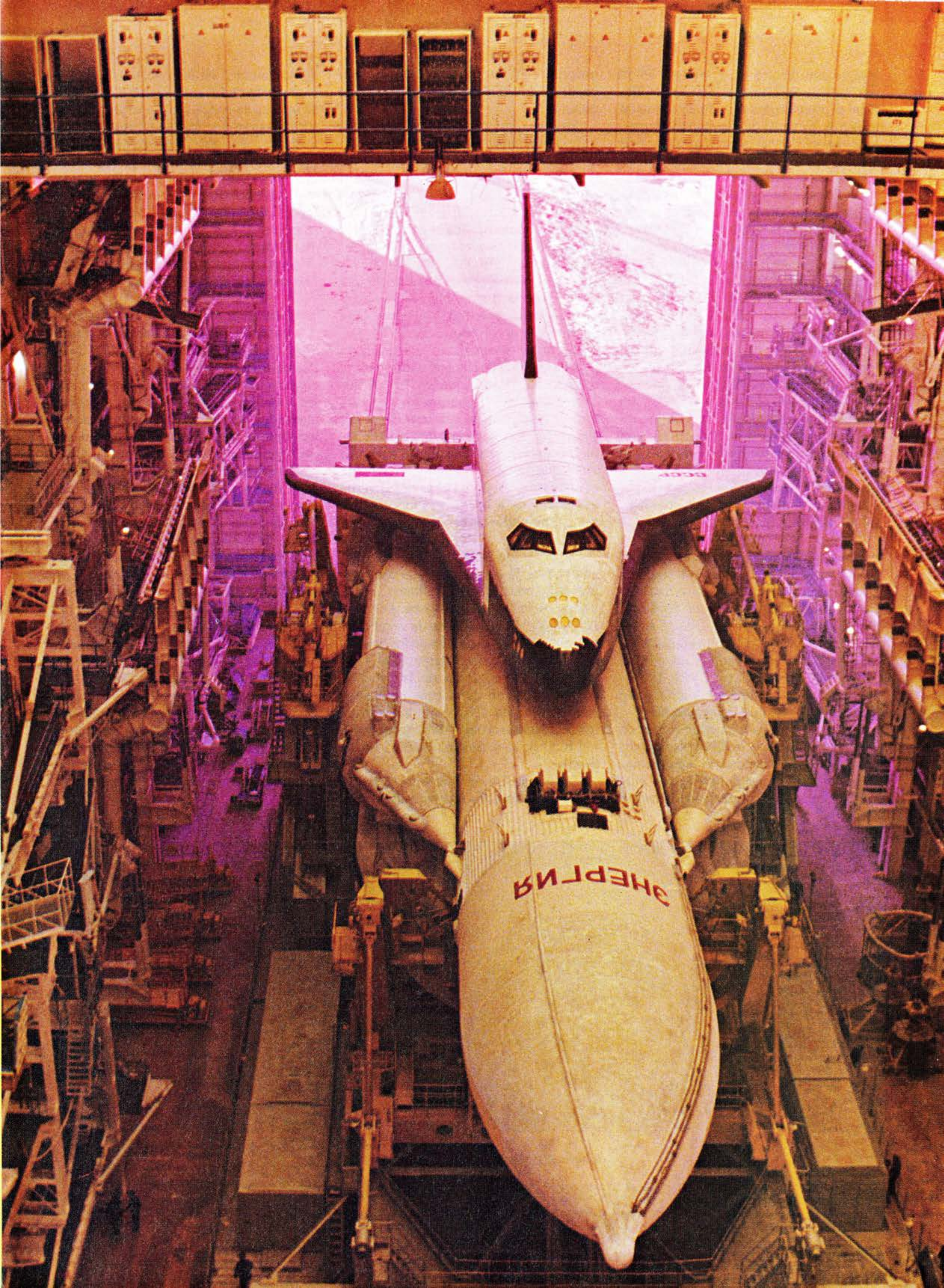
La situación ha cambiado de raíz, al menos en lo que concierne a actividades espaciales no militares. En los tres últimos años, los soviéticos han suministrado detalles de su programa espacial. Han relatado con notable franqueza las circunstancias que rodearon la muerte del cosmonauta Yuri A. Gagarin, en un accidente de aviación el año 1968, y han hecho públicas importantes características técnicas de su cohete Protón, el primer ingenio diseñado exclusivamente para el programa espacial. Se ha abierto a los visitantes occidentales el centro Yuri Gagarin de entrenamiento de cosmonautas, en la Ciudad de las Estrellas, cercana a Moscú, y se ha anunciado con antelación la fecha prevista de diversos lanzamientos, incluido el de la lanzadera *Buran*, transmitiéndose alguno de ellos en directo por televisión. El pasado otoño, cuando dos cosmonautas tuvieron serias dificultades en regresar a la Tierra, los soviéticos trataron informativamente el problema dándole suficiente difusión en todo el mundo.

El espíritu de la "glasnost" muestra la imagen de la investigación espacial como una magna empresa que goza de un amplio soporte nacional. Los lanzamientos espaciales desde bases soviéticas, durante el año 1987, representaron el 86 por ciento de todos los realizados en el mundo. Mientras los Estados Unidos lanzaron ese mismo año ocho cohetes, la Unión Soviética lanzó 95. Tampoco puede decirse que 1987 fuera un año excepcional. Desde mediados de los setenta, los soviéticos lanzan, en promedio, dos cohetes semanales.

A pesar de la disparidad de las cifras, norteamericanos y soviéticos tienen el mismo número de satélites activos en órbita, con misiones parecidas. Se cree que el 80 por ciento de los lanzamientos espaciales soviéticos guardan algún tipo de relación con los intereses de la seguridad nacional: reconocimiento desde el espacio, comunicaciones, navegación y satélites de vigilancia para alertar en caso de un

PETER M. BANKS y SALLY K. RIDE colaboraron en la elaboración de un informe sobre las misiones tripuladas soviéticas en 1987, poco después de que Ride se incorporara a la Universidad de Stanford. Banks es profesor de ingeniería electrónica en Stanford y dirige el laboratorio de radiociencia, telecomunicaciones y espacio de esa universidad. Se interesó en el programa de las estaciones espaciales soviéticas cuando presidía un comité consultivo de la NASA sobre la utilización científica de la estación espacial de los EE.UU. Ride es asesora del Centro Nacional para la Seguridad Internacional y Control de Armamento de Stanford. Voló en dos misiones espaciales de la lanzadera, en 1983 y 1984, y se estaba entrenando para su tercer vuelo cuando ocurrió la tragedia del Challenger. Ride participó en la comisión presidencial que investigó el accidente.

1. LANZADERA SOVIETICA *BURAN*, montada sobre el cohete Energiya, encargado de ponerla en órbita; la vemos en un hangar, antes de su primer vuelo, en el mes de noviembre de 1988. Aunque el diseño es parecido al de la lanzadera norteamericana, *Buran* no necesita piloto. Los soviéticos tienen como mínimo otra lanzadera en fabricación.


ЭНЕРГИЯ

ataque con misiles del enemigo. El 10 por ciento de los lanzamientos se dedica al mantenimiento de la estación espacial. El resto de lanzamientos consiste en misiones científicas de naves automáticas, satélites de comunicaciones civiles y satélites de navegación.

La diversidad y el alto grado de confianza en los distintos cohetes que se utilizan en el programa espacial soviético es una de sus características más notables. Existen nueve vehículos diferentes, amén del más reciente de la serie, el cohete Energiya. Seis de ellos son descendientes directos de los misiles balísticos soviéticos y se han usado durante decenios. A excepción del cohete Energiya, todos utilizan la tecnología bien conocida de cohetes de combustible líquido. El nuevo cohete, en cambio, usa propulsores de hidrógeno-oxígeno líquido. Los soviéticos son poco proclives a retirar un vehículo que ha demostrado en repetidas ocasiones su utilidad; ello explica la rica experiencia acumulada con sus aparatos, salvo en los de diseño más reciente.

Durante 25 años, el cohete SL-4 ha constituido la pieza clave del programa espacial. Desde 1964 se han lanzado más de 900 cohetes de este modelo, incluidos 43 del año 1987, y es todavía el único vehículo que se usa para colocar a los cosmonautas en órbita. Los cohetes Protón, SL-12 y SL-13, cuyos ensayos se remontan a 1965, han ido al espacio en un número no inferior a 115. Estos modelos pueden poner en órbita baja un peso superior al de cualquier cohete homólogo americano. Tanto el SL-4 como el Protón son partes esenciales del proyecto de estación espacial. El Protón lanza los módulos a partir de los cuales se construye dicha estación.

Aunque los cohetes desarrollados durante los años sesenta siguen siendo la columna vertebral del programa espacial soviético, no se ha suspendido el programa de desarrollo de nuevos vehículos lanzadores. En 1985 se introdujo el modelo SL-16; el cohete Energiya, en 1987. Este cohete puede poner en órbita baja alrededor de 100.000 kilogramos. Su diseño es flexible, ya que puede transportar al espacio la lanzadera espacial o actuar exclusivamente como vehículo de transporte.

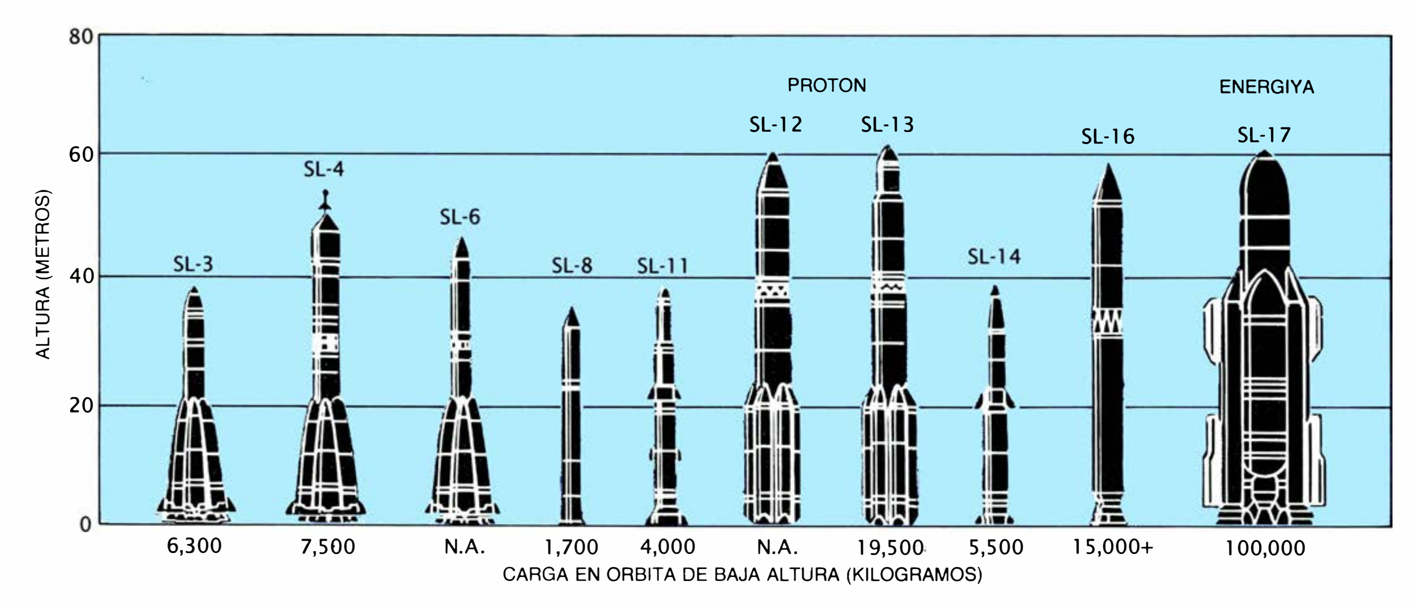
La verdad es que el modelo Energiya guarda una estrecha relación con el modelo SL-16, ya que cuatro de los propulsores de la primera fase de este último equipan la primera fase del Energiya. Esta estrategia muestra las pautas que sigue la ingeniería soviética en el diseño de sus cohetes, en las que el sistema más potente y refinado ha evolucionado a partir de modestos diseños sometidos a prueba una y otra vez.

En la Unión Soviética hay dos cosmódromos: Baikonur en Asia central y Plesetsk, cerca del mar Blanco, a 800 kilómetros al norte de Moscú. Durante 1987, los soviéticos llevaron a cabo 47 lanzamientos en cada una de las dos bases. Los lanzamientos tripulados y los asociados al programa de la estación orbital partieron de la base de Baikonur, aunque en 1987 estos lanzamientos representaron sólo una cuarta parte del total de la actividad en ese cosmódromo.

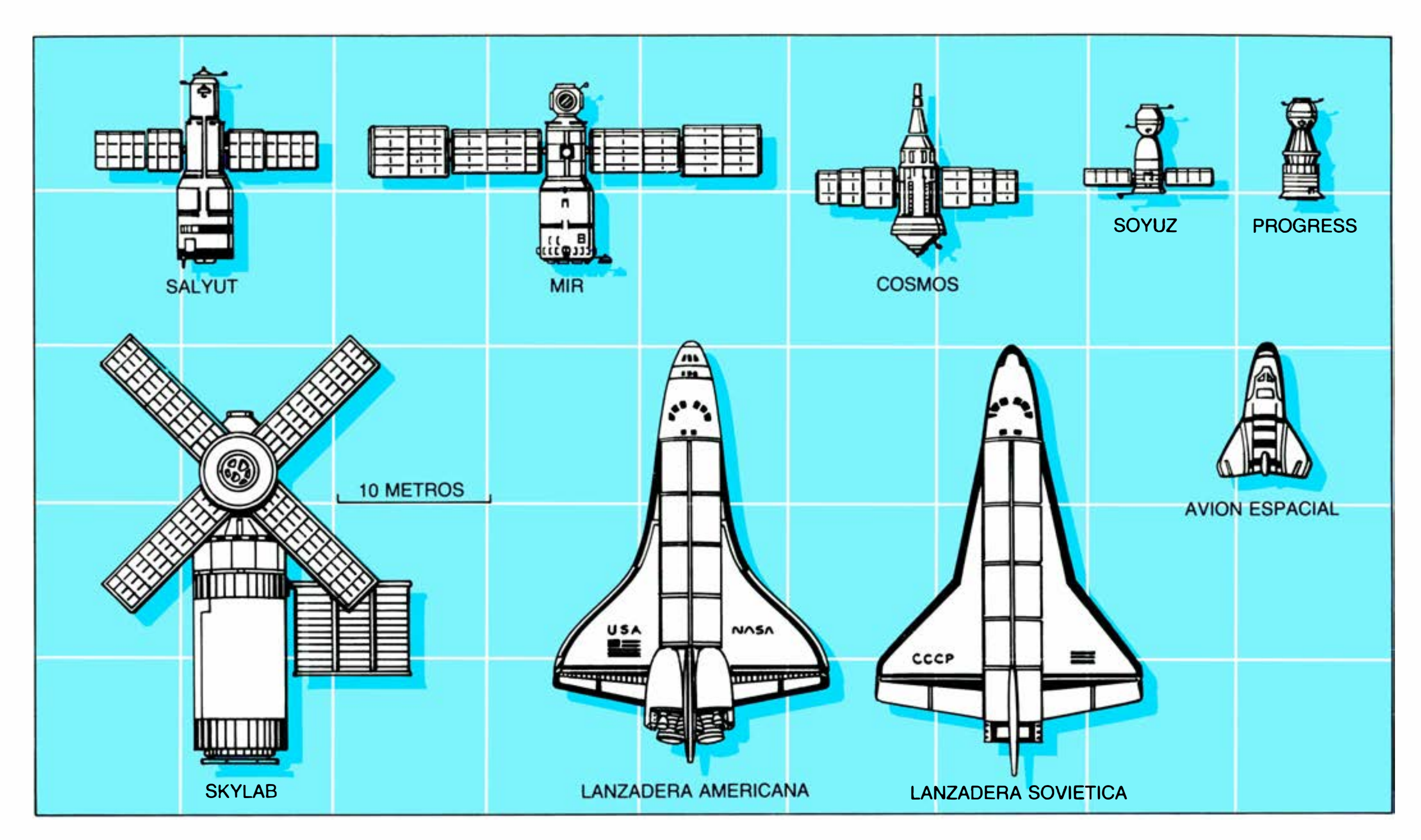
En toda la Unión Soviética se ha tejido una intrincada red de industrias y equipamientos en los que se diseñan y se construyen los satélites y los cohetes, se integra la carga útil, se entrenan las tripulaciones y se lanzan y controlan las misiones. La red requiere individuos expertos y organizaciones preparadas. Aunque el ritmo del desarrollo tecnológico en la URSS es más lento que en los EE.UU., los 30 años de empeño y experiencia han producido un sistema de transporte espacial sólido, en el que el mantenimiento de la estación orbital *Mir* constituye una actividad más.

La era de la exploración espacial empezó en 1957, al lanzarse el *Sputnik I*. Aunque con anterioridad los expertos soviéticos y norteamericanos ya conocían la importancia estratégica de los cohetes y de los satélites en órbita alrededor del planeta, el Sputnik dio el aldabonazo que despertó la conciencia del sentido del acceso al espacio. Con el lanzamiento del Sputnik, la Unión Soviética se convirtió de repente en una superpotencia técnica. Aunque errónea, esta percepción avivó los temores de la sociedad norteamericana e influyó en las decisiones políticas que dieron inicio a la carrera espacial.

En un comienzo, la seguridad nacional y el prestigio fueron los principios que determinaron los programas espaciales de ambas naciones. Los vuelos de los cosmonautas gozaban de gran publicidad y pronto se convirtieron en un índice de la destreza técnica de cada nación. A comienzos de los años sesenta, los soviéticos consiguieron algunos éxitos: primer hombre en el espacio (Gagarin), primera mujer (Valentina V. Tereshkova) y primer paseo espacial.



2. VEHICULOS DE LANZAMIENTO usados en el programa espacial soviético. Esos aparatos han evolucionado desde el modelo SL-3 hasta el último y más potente SL-17, el cohete Energiya. Los cohetes SL-4 y Protón constituyen las piezas fundamentales sobre las que se sustenta el programa soviético de estaciones espaciales. Desde que se proyectaron, a comienzos de la década de los sesenta, se han lanzado al espacio más de 900 SL-4 y más de 100 Protón.



3. SE MUESTRAN LAS NAVES que han representado o representarán un papel histórico en el programa espacial soviético, junto a la estación espacial norteamericana *Skylab* y a la lanzadera espacial de los EE.UU. Los soviéticos no han declarado aún ante la opinión pública la construcción de su avión espacial.

El presidente John F. Kennedy, sin embargo, cambió el rumbo de los acontecimientos, proponiendo como objetivo prioritario el enviar una misión tripulada a la superficie de la Luna antes del fin de la década. El desafío patriótico de Kennedy y el liderazgo de Lyndon B. Johnson impulsaron la ciencia y el desarrollo tecnológico, dando una finalidad específica al programa Mercurio y abriendo el camino a los programas Gemini y Apolo.

Ahora bien, para viajar a la Luna era imprescindible prepararse con seriedad. Mientras los astronautas desarrollaban las técnicas de encuentro y acoplamiento entre las cápsulas espaciales y los fisiólogos estudiaban el efecto de la ingravidez en el cuerpo humano, los ingenieros proyectaron y sometieron a ensayo el sistema de lanzamiento, el cohete Saturno, y los científicos enviaron sondas al espacio para cartografiar la superficie lunar.

Aunque nunca lo han reconocido, los soviéticos se embarcaron también en un esfuerzo parecido con el propósito de llevar los cosmonautas a la Luna. Su interés en el proyecto era evidente desde 1959, cuando tres vehículos espaciales Luna fueron enviados hacia nuestro satélite, proporcionando las primeras imágenes de la cara oculta del mismo. Las naves Luna continuaron sondeando la Luna y su entorno en más de 21 misiones.

A mediados de los sesenta, los soviéticos habían desarrollado un módulo similar al Apolo, la cápsula espacial Soyuz. Con este vehículo versátil, adquirieron la imprescindible experiencia en el encuentro y acoplamiento de naves espaciales. Pero los planes se retrasaron ante su incapacidad para desarrollar un cohete que lanzara vehículos pesados, como el norteamericano *Saturno-5*, que puede colocar 140.000 kilogramos en órbita baja alrededor de la Tierra. El afán soviético por pisar antes que nadie nuestro satélite se desvaneció cuando los astronautas del *Apolo 11* alunizaron el año 1969.

Aunque los soviéticos realizaron exploraciones de la Luna mediante sondas automáticas hasta 1976, abandonaron su objetivo inicial de enviar allí cosmonautas. No obstante, el programa de vuelos tripulados en órbitas bajas continuó. En 1969 se lanzaron cinco misiones Soyuz, y en 1970 dos cosmonautas superaron el récord de permanencia en el espacio, en poder de los norteamericanos de la misión Gemini, permaneciendo en órbita 18 días.

Mientras tanto, los Estados Unidos y la Unión Soviética continuaron con el desarrollo de la infraestructura y de la técnica espacial que diera soporte a su seguridad nacional. La distinta capacidad técnica de uno y otro país aconsejó estrategias diferentes. Los ingenieros norteamericanos construyeron satélites cada vez más seguros y eficaces, que no necesitaban sustituirse con tanta frecuencia como sus predecesores; en consecuencia, la tasa de lanzamientos del programa espacial norteamericano disminuyó a finales de los sesenta. La infraestructura del programa espacial norteamericano evolucionó, por tanto, hacia el lanzamiento de un número reducido de satélites cada vez más perfeccionados.

La técnica soviética de satélites no progresó tan deprisa. Por eso, los rusos debieron continuar insistiendo en los lanzamientos de satélites menos refinados y de menor fiabilidad. Fue en este tiempo cuando los soviéticos sembraron las semillas de lo que después se convertiría en el dinámico programa de la estación espacial. A comienzos de los setenta, los Estados Unidos se hallaban en la cresta de la ola del éxito generado por el programa Apolo; paulatinamente, la necesidad de programas de lanzamiento civiles y militares disminuyó. La Unión Soviética, por el contrario, desarrolló una sólida infraestructura de soporte espacial, que se aplicaba prioritariamente a sus necesidades de seguridad nacional. Y ello, sin cejar en su programa de cosmonautas. La cápsula Soyuz y el cohete impulsor Protón, desarrollado para el programa lunar, se convirtieron en firmes puntales del programa que pretendía man-

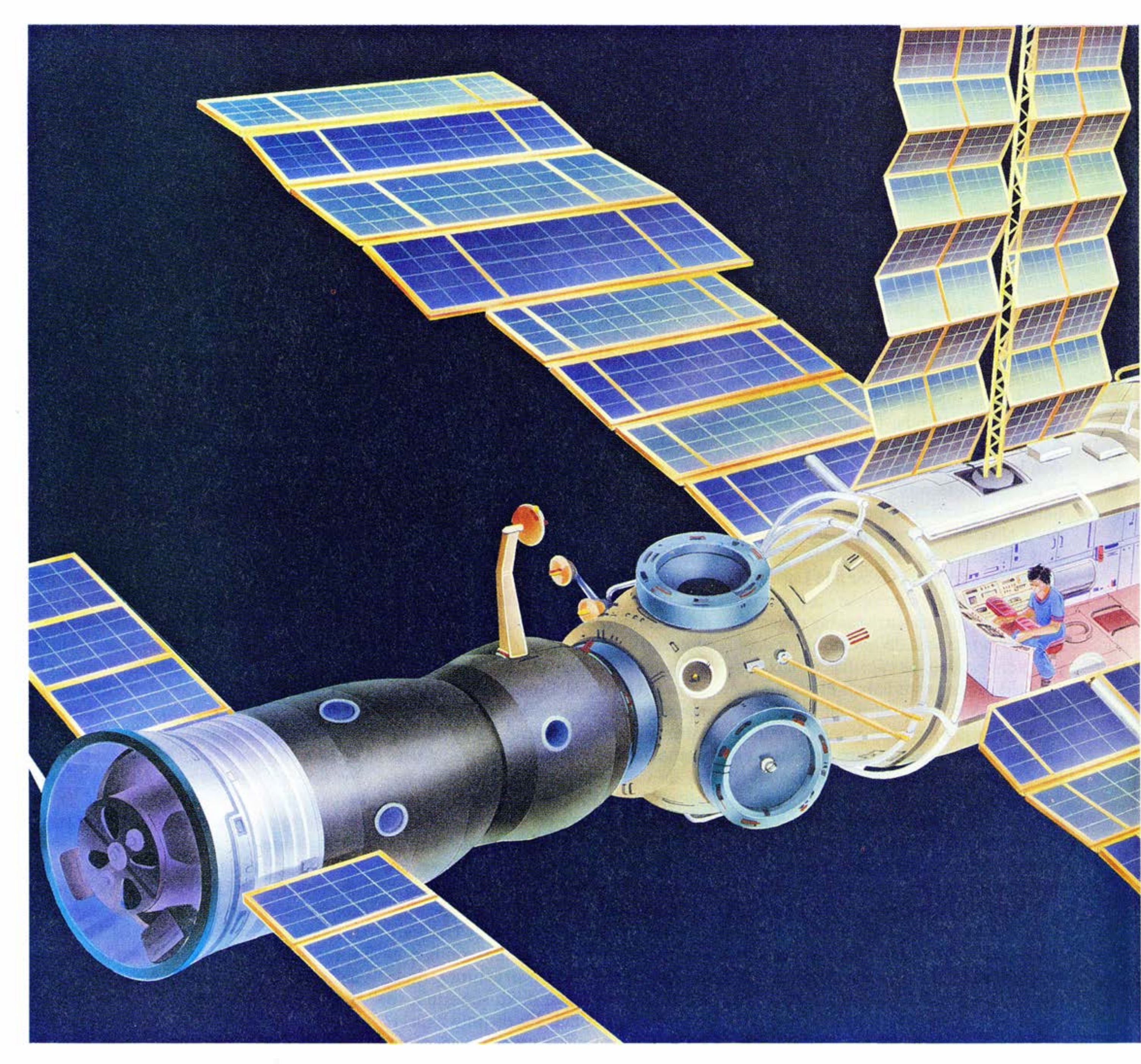
tener cosmonautas en órbita baja alrededor de la Tierra, de forma segura y rentable.

En abril de 1971, el cohete Protón lanzó la primera estación espacial terrestre, denominada *Salyut 1*. Cuatro días después, la cápsula *Soyuz 10*, impulsada por un cohete SL-4, transportaba dos cosmonautas hacia la estación orbital. La cápsula con sus pasajeros y su pequeña carga se ensambló a la estación espacial y permaneció allí hasta que los dos astronautas la usaron para regresar de nuevo a la Tierra. Aunque analizada bajo el prisma americano la misión no revestía complicación técnica, la estación Salyut contribuyó a consolidar la permanencia, durante largos períodos, del hombre en el espacio.

Fracasaron en su primer intento; después de acoplarse con la estación, los cosmonautas de la *Soyuz 10* no lograron abrir la escotilla de la Salyut, viéndose obligados a retornar de inmediato a la Tierra. Seis semanas más tarde, la cápsula *Soyuz 11* realizó una misión que, aunque acompañada de un éxito inicial, acabó en desastre. Tres astronautas acoplaron la cápsula a la *Salyut 1* y permanecieron allí durante un tiempo récord: 23 días en el espacio. Durante el retorno, la cápsula Soyuz se despresurizó y la tripulación falleció antes del aterrizaje.

El accidente obligó a un retraso, de 27 meses, del programa de vuelos de la Soyuz e instó un nuevo diseño del vehículo espacial. Desde entonces, los cosmonautas se equipan con trajes presurizados para el lanzamiento y la reentrada.

Durante el tiempo de diseño de la nueva cápsula, se eliminó deliberadamente la *Salyut 1*. Dos años más tarde, fracasaron los dos intentos de reemplazarla. La *Salyut 2*, lanzada en abril de 1973, no pudo estabilizarse y quedó en órbita fuera de servicio. Otro ingenio, lanzado en mayo del mismo año, tuvo problemas con los controles



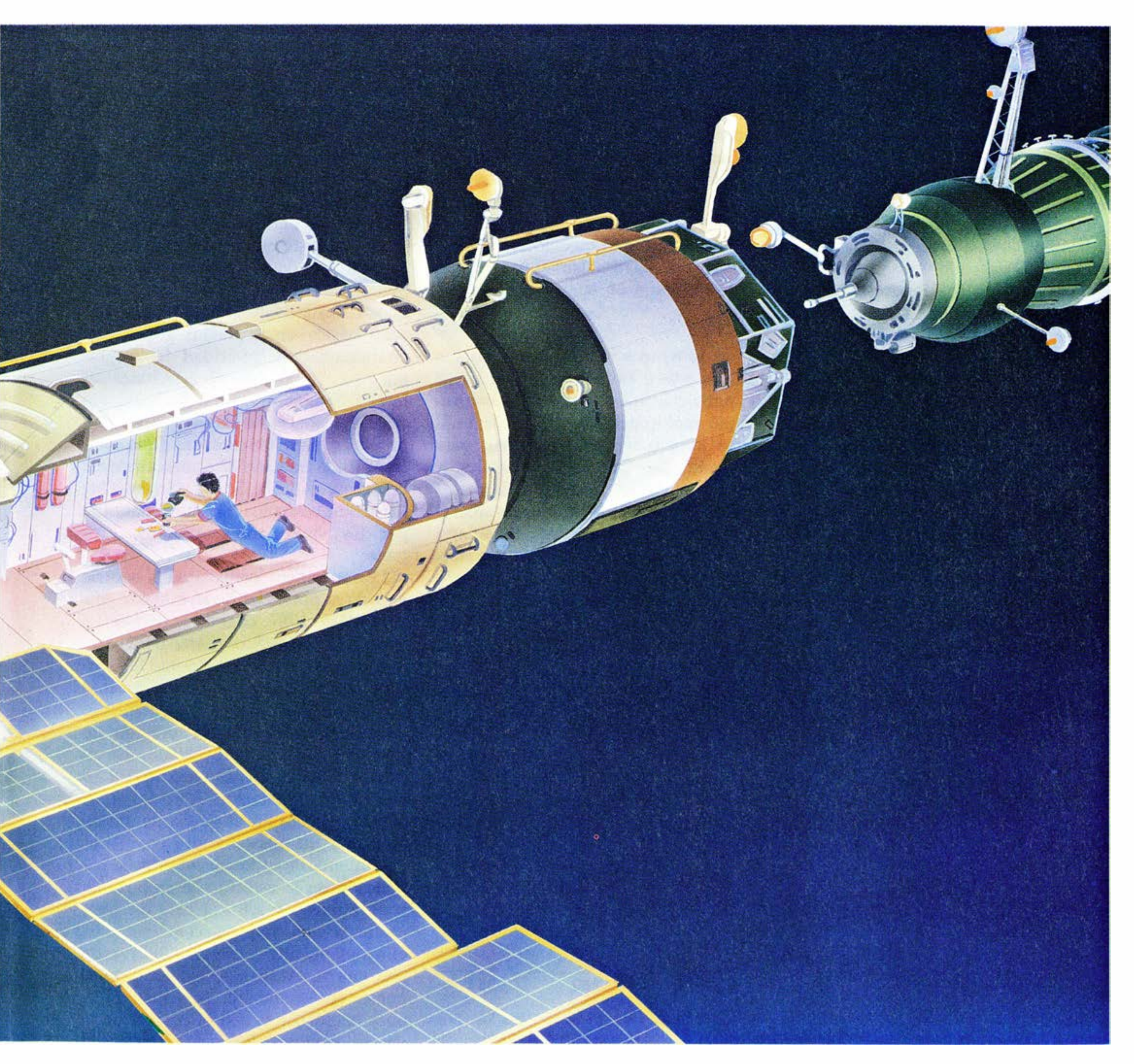
4. LA ESTACION *MIR* constituye un buen ejemplo de la configuración típica de una estación espacial versátil. La tripulación viaja en la cápsula Soyuz que está ensamblada en la zona de amarres de la estación, donde quedan cuatro puntos más de amarre (*izquierda*). El módulo científico *Kvant* se halla acoplado

de altitud y agotó todo su combustible y carburante.

Entre junio de 1974 y junio de 1976, se lanzaron tres Salyut, que encontraron algunas dificultades, aunque cada estación alojó como mínimo a una tripulación. La ocupación media de cada estación representó sólo el 10 o 15 por ciento del tiempo total que estuvieron en órbita. Los cosmonautas a bordo de las estaciones realizaban múltiples experimentos básicos y observaciones, muchos de los cuales revestían interés militar en opinión de los observadores occidentales.

Las cuatro estaciones Salyut lanzadas entre 1971 y 1976 integran la primera generación de las estaciones orbitales soviéticas. Su tamaño era modesto: el volumen habitable se limitaba a 100 metros cúbicos y pesaban 26.000 kilogramos cuando estaban acopladas a una cápsula Soyuz. La potencia eléctrica era escasa y sus habitáculos espartanos. Además, las Salyut de la primera generación tenían sólo un punto de acoplamiento. Puesto que la nave de los astronautas que ocupaban la estación se acoplaba a este punto no había forma de reabastecer la estación con otra nave auxiliar. Cada Soyuz debía transportar suficiente alimento, agua y combustibles para atender las necesidades de los dos o tres miembros de la tripulación durante su alojamiento en la estación.

No obstante esas limitaciones, los soviéticos adquirieron valiosa experiencia trabajando en instalaciones situadas en órbitas bajas. Mientras tanto, los EE.UU. experimentaban también con la permanencia prolongada en ingenios en órbita baja. El cohete Saturno-5, que se había desarrollado durante el programa Apolo, lanzó en 1973 la estación orbital *Skylab*. Era mucho más cómoda que su homóloga Salyut: el habitáculo de los astronautas medía 350 metros cúbicos y pesaba 90.000 kilogramos, incluido el módulo Apolo con el que viajaba la tripulación.



en el otro extremo de la estación orbital y un vehículo automático Progress se está preparando para ensamblarse al *Kvant* (*derecha*). En el interior de la estación hay habitaciones para los dos cosmonautas que residen allí, así como para las tripulaciones visitantes que transporten un número máximo de cuatro.

Tres tripulaciones distintas visitaron el *Skylab* durante 28, 59 y 84 días, realizando múltiples experimentos en medicina espacial y fisiología humana, amén de llevar a cabo numerosas observaciones solares y astronómicas. Aunque el *Skylab* tenía dos puntos de amarre, no se hizo ningún intento para reabastecerlo. En 1974, la estación fue puesta en órbita de hibernación y cinco años más tarde la fricción con la atmósfera terrestre destruyó la estación sobre el cielo australiano.

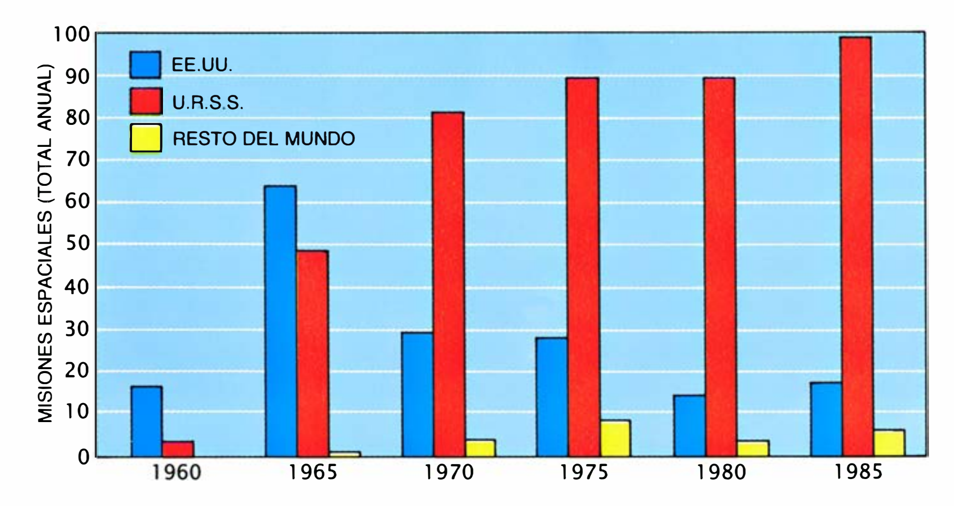
En septiembre de 1977, se lanzó la *Salyut 6*, la primera estación orbital soviética correspondiente a la segunda generación. El núcleo de la nueva estación era casi idéntico respecto al de anteriores estaciones, aunque el ingenio tenía varias mejoras, entre las que destacaba un segundo punto de acoplamiento. Este permitía el ensamblaje simultáneo, en la estación orbital, de dos vehículos. Así, el reavituallamiento de la nave se realizaba con una tripulación a bordo.

La primera misión de estas características se llevó a cabo en 1978, en la *Salyut 6*. El vehículo transportador fue una nave automática Progress, un modelo Soyuz modificado, lanzada por un cohete SL-4 y guiada desde la Tierra para su encuentro con la Salyut. Una vez realizado el ensamblaje, se procedió al avituallamiento automático, sin la intervención de los cosmonautas. Las naves del modelo Progress constituyen todavía el medio principal de suministro a las estaciones orbitales soviéticas.

Los viajes automáticos de la nave Progress desvincularon el transporte de cosmonautas del transporte de equipamiento a la Salyut y facilitaron la posibilidad de que las visitas de los cosmonautas a la estación se prolongaran durante un mayor período de tiempo. La primera tripulación de la *Salyut 6* permaneció en órbita 96 días, superando el récord de permanencia de los norteamericanos y de los soviéticos, que en aquel momento era de 84 y 63 días, respectivamente. En 1982, la estación *Salyut 7* reemplazó a la *Salyut 6*, mientras se superaba sistemáticamente el récord de permanencia en el espacio. Las sucesivas tripulaciones permanecieron en órbita 96, 140, 175, 185, 75, 211, 150 y, finalmente, 237 días. Globalmente, entre la *Salyut 6* y la *Salyut 7*, el porcentaje de tiempo de ocupación se aproximó al 45 por ciento. Las dos estaciones alojaron 11 tripulaciones estables que permanecieron un tiempo bastante prolongado, recibiendo la visita de 15 tripulaciones, con 10 astronautas extranjeros.

La estación *Salyut 7*, durante el tiempo en que estuvo en funcionamiento, recibió módulos de los tipo Soyuz y Progress que realizaron 52 acoplamientos. La verdad es que las operaciones de encuentro en el espacio, de acoplamiento y de reavituallamiento en órbita se convirtieron en operaciones rutinarias.

Los soviéticos introdujeron también un nuevo modelo Soyuz, el Soyuz T; hubo cuatro vuelos de un nuevo vehículo multifuncional que podía utilizarse para transportar material, para expandir las estaciones orbitales y como remolcador espacial. La *Salyut 7* se equipó con unos puntos de amarre rediseñados y con más paneles solares que proporcionaban más potencia eléctrica. Es evidente que los soviéticos aprendían de la experiencia.



5. NUMERO DE LAS MISIONES ESPACIALES de los Estados Unidos y de la Unión Soviética. Las cifras han invertido su sentido de una forma drástica desde 1960. Hoy en día, los lanzamientos soviéticos al espacio dan cuenta de más del 85 por ciento del total de lanzamientos en toda la Tierra. Sin embargo, los satélites soviéticos tienen una duración menor con lo que las dos naciones mantienen un número parecido de satélites en órbita. China, Japón y la Agencia Espacial Europea llevan a cabo cada año algunos lanzamientos.

La estación orbital *Mir*, lanzada al espacio en febrero de 1986, representa el inicio de la tercera generación de las estaciones orbitales soviéticas. Los rasgos de sus progenitoras son evidentes: se parece bastante a las Salyut, aunque distintas mejoras interiores y exteriores la hacen cualitativamente diferente de sus predecesoras. Tiene a bordo ocho ordenadores independientes que permiten el mejor control y utilización de la estación, con sistemas automáticos que gobiernan la mayor parte de dispositivos del interior de ésta y el seguimiento orbital, liberando a los cosmonautas de las pesadas "tareas domésticas". Unos paneles de células fotoeléctricas, mayores y más eficientes, suministran a la estación una mayor potencia eléctrica. Las comunicaciones entre la estación y el centro de control en las cercanías de Moscú se realizan a través de un satélite de comunicaciones soviético o siguiendo el viejo método tradicional: mediante buques de rastreo o estaciones de seguimiento distribuidas por el territorio soviético.

El avance más significativo, sin embargo, consiste en la incorporación, en un extremo de la estación, de cinco puntos de amarre, lo que le confiere mayor flexibilidad con respecto al diseño básico de la Salyut y potencia enormemente la capacidad del programa espacial soviético de estaciones orbitales. Si añadimos el punto de amarre frontal, son seis las naves que pueden prenderse simultáneamente de la estación. En la estación *Mir* aparcan desde la última cápsula Soyuz (Soyuz-TM) hasta los vehículos Kosmos, pasando por los viejos transportadores Progress.

Los soviéticos empezaron a sacarle partido al potencial de la estación *Mir* en abril de 1987, cuando le añadieron el módulo científico *Kvant* de 11.000 kilogramos de peso. El módulo fue lanzado por un cohete Protón que lo situó en una órbita baja. El acoplamiento con la estación orbital, sin embargo, no funcionó según lo proyectado. En el primer intento, *Kvant* pasó sólo a 10 metros de la estación *Mir*; en el siguiente, las dos naves quedaron unidas mediante un ensamblaje incompleto. Por último, en el tercer intento, la tripulación de la estación se embozó su traje espacial y salió al exterior para examinar cuál era la causa que impedía el acoplamiento correcto. Observaron que una funda de plástico obstruía el punto de ensamblaje principal. Después de consultar con el control de la misión, quitaron la funda y pudieron contemplar cómo el módulo quedaba ensamblado en la estación.

Los logros del módulo *Kvant* tienen, además de valor científico, importancia política. Los experimentos llevados a cabo en este módulo atrajeron una destacada participación occidental en el programa espacial soviético. Buena parte del módulo constituye la base Roentgen, dedicada a la astrofísica de alta energía y fruto de la colaboración entre grupos soviéticos y otros de Europa occidental.

De los cinco telescopios de la Roentgen, cuatro proceden de grupos astrofísicos de Inglaterra, Alemania occidental, Holanda y Suiza. Los instrumentos de alta calidad, desarrollados anticipándose a los vuelos a bordo de satélites de la NASA y de la Agencia Espacial Europea, potencian enormemente el valor científico del módulo *Kvant* y de la estación *Mir*. Poco después de empezar a funcionar registraron ya una valiosa información: la primera observación en rayos X de la espectacular supernova SN 1987a.

Pero el módulo *Kvant* es algo más que un módulo científico. Lleva a bordo giroscopios para el control del impulso que facilitan las maniobras de la *Mir* y la auxilian para mantener orientaciones específicas. Las estaciones anteriores utilizaban pequeños cohetes para este control. El ahorro de combustible que supone el nuevo sistema se compensa con el alto consumo eléctrico del mismo. La potencia media de la estación se cifra en unos 12 kilowatt, más que la que se disponía en las anteriores estaciones espaciales, pero sensiblemente inferior a la que proporcionan las tres celdillas de combustible de la lanzadera espacial norteamericana.

Está previsto que este mismo mes de abril la estación *Mir* crezca con un nuevo módulo de servicio de 12,5 metros y 20.600 kilogramos de peso. El módulo va equipado con nuevos paneles solares y una escotilla de un metro que permitirá aparcar un pequeño vehículo para el trabajo en el exterior de la estación. En el curso de este año se prevé también la incorporación de otros módulos destinados a estudios tecnológicos y para observaciones de la Tierra. Parece que los soviéticos tienen la intención de prolongar aún más la permanencia de los cosmonautas en la estación, con la presumible finalidad de recabar mayor información experimental acerca de los efectos fisiológicos de la ingravidez.

Sin olvidar los factores sociológicos y psicológicos que limitan el rendimiento y la resistencia de los cosmonautas, la estación *Mir* proporciona unos habitáculos más confortables que las estaciones de antes. En la "sala" hay menos bultos voluminosos, y cada cosmonauta posee su propia cabina cerrada con una cama y una pequeña ventana. Se envía regularmente a la tripulación cintas de vídeo y de audio, y mantiene frecuentes contactos con su familia, sus colegas y sus amigos en la Tierra.



6. AVION ESPACIAL A ESCALA, fotografiado por un avión de las fuerzas aéreas australianas que volaba sobre un buque soviético, en el océano Indico. La tripulación del barco recuperaba el modelo del agua, donde había amerizado después de un vuelo de prueba. El tamaño real duplica o triplica quizás este prototipo.

El programa de trabajo diario es denso y todas las instalaciones están muy solicitadas. Vladimir A. Shatalov, antiguo cosmonauta y jefe de entrenamiento en la Ciudad de las Estrellas, señala que las condiciones de vida a bordo de la estación son más duras incluso que las que se dan entre la tripulación de los submarinos. Deben apreciarse, en estas condiciones, las grandes cualidades de Vladimir G. Titov y Musa K. Manarov, los dos cosmonautas que regresaron a la Tierra el pasado mes de diciembre, después de pasar un año en la estación *Mir*.

De lo tratado hasta aquí, se desprende que la Unión Soviética ha establecido un programa activo y bien orquestado para la estación orbital, usando una técnica que, calibrada con normas occidentales, quizá no resulte muy avanzada. Los soviéticos han mantenido la presencia humana en el espacio y han dominado la logística de las complejas operaciones espaciales. El movimiento de materiales y de cosmonautas, en uno y otro sentido, de Tierra a la estación y viceversa, ha sido intenso e impresionante. Los componentes del programa han desarrollado su capacidad, son fiables, se han producido en masa y representan la base sobre la que se edifica una agenda cada vez más ambiciosa.

Y ello, sin que la actividad de la estación forzara la infraestructura espacial soviética ni frenara la capacidad de lanzamiento. De los 50 lanzamientos de los cohetes SL-4 y Protón, sólo se necesitan de ocho a doce para mantener el programa de la estación orbital. En cambio, el acoplamiento de Freedom, la estación espacial norteamericana, bastante mayor, fechado para mediados de los noventa, requerirá unos 20 vuelos de lanzadera. Además, al no haber misiones automáticas para el transporte de equipos y de combustible, el funcionamiento de la estación requerirá, por lo menos, de cinco a siete vuelos de lanzadera anuales, una vez que la estación Freedom se encuentre desplegada. Estos vuelos representarán una fracción muy importante de los 12 a 14 consignados, cada año, a la lanzadera.

El diseño del sistema de transporte de la estación *Mir*, con cosmonautas a bordo de cápsulas Soyuz y el equipamiento acarreado en naves automáticas, proporciona flexibilidad en el proyecto de las misiones y permite tratar el problema de la seguridad humana de una forma independiente. Esta flexibilidad no aparece en el proyecto de la estación espacial norteamericana.

Las misiones científicas soviéticas no

están limitadas por la capacidad de lanzamiento, sino por la cantidad de equipos de alta calidad que pueden obtener. Si continúan atrayendo la colaboración de países occidentales como han hecho con el módulo *Kvant*, la estación *Mir* y sus sucesoras se convertirán en importantes estaciones científicas. De hecho, el programa espacial soviético ha pasado a ser un medio de promoción de lazos científicos, económicos y políticos con los países occidentales. Durante cierto tiempo, los rusos se apoyaron en el programa de cosmonautas para estrechar las relaciones con los países del bloque soviético. Así, dentro del programa soviético han intervenido cosmonautas de países de Europa del este, Cuba, Vietnam, Mongolia, Francia, Siria y Afganistán.

Ahora invitan a una mayor participación extranjera en su programa del espacio y se han embarcado en una agresiva campaña publicitaria. Los vehículos y los servicios de lanzamiento tienen un precio bajo comparado con los precios en Occidente. También se pueden comprar sin dificultad imágenes de satélites de alta resolución de la superficie terrestre (salvo de la Unión Soviética y los países comunistas de Europa) y se han puesto a la venta servicios de comunicación por satélite. Ello les sirve para sacar otro tipo de rendimiento a los instrumentos de la *Mir*.

Hasta ahora, el esfuerzo propagandista soviético ha encontrado reticencias, pero su oferta no debe despreciarse. Las facilidades del programa soviético son atractivas para muchos científicos, para muchas compañías y distintos países que tradicionalmente se apoyaban en los Estados Unidos en su acceso al espacio.

¿Qué puede esperarse del programa de la estación espacial de cara al futuro? En primer lugar, es evidente que los soviéticos seguirán mejorando sus métodos de transporte de personal y material. Un buen ejemplo de ello es la lanzadera soviética. Aunque en apariencia parece un cambio en la estrategia imperante, la lanzadera incrementará la capacidad de transporte, pero no reemplazará los medios ya existentes. Proporcionará otros para recuperar grandes cantidades de material a la Tierra, capacidad de la que hoy carece. La lanzadera espacial será, pues, un elemento más del programa espacial, no la pieza esencial.

Otro elemento novedoso es el pequeño avión espacial. Sin presentación oficial, su existencia se descubrió años atrás, cuando un piloto de las fuerzas aéreas australianas fotografió sobre el océano Indico un modelo a escala durante su proceso de recuperación en alta mar por la tripulación de un barco soviético, después de un vuelo de prueba.

Los analistas occidentales consideran que el avión espacial será lanzado por un cohete SL-16 y transportará a dos o tres personas, y, quizás una pequeña cantidad de material, a una órbita baja. Podría aterrizar en una pista tradicional. El avión serviría también de vehículo de transporte entre distintas instalaciones espaciales, para inspeccionar satélites y como vehículo de rescate de urgencia.

Francia ha presionado a la Agencia Espacial Europea para que acometa el desarrollo de un vehículo similar: el Hermes. Su puesta en servicio se prevé para finales de los noventa. La fuerza aérea de los Estados Unidos estudió la posibilidad de un avión espacial a principios de los años sesenta, en el marco del proyecto Dyna-Soar. Abandonada la idea en 1965, dado el coste y la falta de utilidad específica para el avión en el programa espacial militar, hoy se ha puesto de nuevo sobre el tapete.

La próxima generación de estaciones orbitales soviéticas está en camino. Si la historia de las Salyut se repite, la *Mir* persistirá cuatro años más. Sin duda, el cohete Energiya habrá de desempeñar un papel fundamental en los planes de las futuras estaciones espaciales soviéticas. Será el cohete que pondrá en órbita el armazón de la próxima estación orbital. Los soviéticos han señalado que este cohete podría constituir una etapa transitoria hacia otro cohete mucho mayor.

Es probable también que se extienda la permanencia de los cosmonautas en el espacio. Ahora bien, ni siquiera una gran estación orbital, a órbita baja, requiere que los cosmonautas permanezcan a bordo tanto tiempo como Titov y Manarov. Los científicos estiman que el rendimiento humano alcanza su máximo si el ciclo de permanencia es de cuatro a seis meses.

¿Pueden ser estos ensayos el presagio de un programa que pretenda enviar cosmonautas a Marte? Quizá, pero esto no ocurrirá en un futuro próximo. Es cierto que el desarrollo del cohete Energiya y el conocimiento de los efectos de la ingravidez son necesarios para llegar a Marte; lo es también que los representantes soviéticos han hablado con frecuencia de Marte. Pero una expedición a ese planeta constituye un proyecto ingente, mucho mayor que el proyecto Apolo, por ejemplo. Semejante propósito requeriría de 15 a 20 cohetes Energiya para poner en órbita baja todos los elementos y el combustible para que se pudiera ensamblar el vehículo que viajara a Marte. Para alojar a los trabajadores que montarían el vehículo, y para almacenar y probar el vehículo y sus sistemas, se necesitaría una nueva generación de estaciones espaciales. Todo el programa comportaría un trabajo extraordinario que conllevaría el esfuerzo y la dedicación de una generación entera.

Los soviéticos han avanzado buen trecho en su programa espacial con unos medios técnicos modestos. En la actualidad, el cohete Energiya, la lanzadera espacial y el avión espacial abren nuevas perspectivas que les permitirán proponerse y alcanzar ambiciosas cotas durante la próxima década.

Los éxitos del programa soviético resultan más impresionantes si los comparamos con los problemas que han sufrido los norteamericanos. Buen ejemplo son las polémicas surgidas a raíz del desgraciado accidente del Challenger, cuando se puso en cuestión la política espacial, los planes futuros e incluso la capacidad nacional. Mientras una gran estación orbital soviética surca el espacio ya en su tercer año en órbita, los objetivos de la estación norteamericana siguen siendo inciertos y los planes para su construcción prevén, como mínimo, un plazo de siete años. Mientras los norteamericanos debaten su programa de estaciones orbitales, los soviéticos habitan un complejo humilde, pero eficaz, y hacen planes para otros mayores.

¿Pueden los EE.UU. manejar su técnica espacial, que está más desarrollada, con la habilidad suficiente para montar un programa tan ambicioso como el soviético? Ciertamente pueden, aunque tendrán que seguir las pautas del programa competidor: compromisos políticos y financieros a largo plazo que permitan objetivos también a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HEAVENS AND THE EARTH: A POLITICAL HISTORY OF THE SPACE AGE. Walter A. MacDougal. Basic Books, Inc., 1985.

SOVIET SPACE STATIONS AS ANALOGS. B. J. Bluth y Martha Helppie. System Engineering and Integration Group, Distributed Systems Branch, SSE, NASA; agosto de 1986.

THE SOVIET YEAR IN SPACE 1988. Nicholas L. Johnson. Teledyne Brown Engineering, Colorado Springs Office, 1250 Academy Loop, Suite 240, Colorado Springs, Colorado 80910, 1989.

Genes para ver los colores

Aislados recientemente, los genes que determinan las proteínas del ojo responsables de la detección de los colores suministran información sobre la visión normal y las bases genéticas de la ceguera a los colores

Jeremy Nathans

"Los colores –escribió Leigh Hunt, poeta del siglo XIX– son las sonrisas de la naturaleza." ¿Cómo puede cualquier observador distinguir entre una sonrisa y otra? En gran medida, la respuesta a esta pregunta tiene que ver con tres tipos de células coniformes sensibles al color, presentes en la retina. Dichas células, según contengan pigmentos rojos, verdes o azules, responden de forma distinta a la luz reflejada por un objeto coloreado. Los pigmentos, proteínas que absorben luz, son especialmente sensibles a las regiones de longitud de onda larga (rojo), media (verde) o corta (azul) del espectro de luz visible. Las cantidades relativas de luz absorbidas por cada tipo de cono se traducen en señales eléctricas por los nervios de la retina y se transmiten después al cerebro, donde el conjunto de estímulos provoca la sensación de un color específico.

El papel de los pigmentos en la discriminación del color se conoce desde hace décadas, aunque sus estructuras no se han dilucidado hasta recientemente. El autor y sus colegas han identificado los genes que determinan tales pigmentos, descifrado sus estructuras y deducido las secuencias de aminoácidos de las proteínas. Este trabajo, realizado en la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, permitirá muy pronto el aislamiento de los propios pigmentos y el análisis de su función. Los estudios realizados por el autor han suministrado también información sobre la evolución de la percepción normal del color y de una variante de ésta, la ceguera a los colores. (En realidad, el término es inapropiado, ya que son pocas las personas que no perciben color alguno.)

Los nuevos descubrimientos van añadiendo detalles a este rompecabezas que es el fenómeno de la visión de los colores, cuyas piezas se han ido encajando poco a poco a lo largo de los últimos siglos. Isaac Newton realizó la primera contribución importante hace unos 300 años, cuando descubrió el espectro de los colores. Observó que la luz del sol, o luz blanca, se descomponía en una secuencia continua de colores al ser refractada por un prisma de cristal. Observó también que, en cada ángulo de refracción, la luz presentaba un color característico, desde el rojo en el caso de los rayos con un menor grado de refracción, hasta el naranja, amarillo, verde, azul y violeta para los que sufrían un grado de refracción progresivamente mayor. Hoy sabemos que cada ángulo de refracción y, por tanto, cada color puro, corresponde a luz de distinta longitud de onda.

Newton observó también que el ojo humano suele ser incapaz de distinguir colores formados por combinaciones muy diferentes de luces. Encontró, por ejemplo, que ciertos pares de luces con distinto ángulo de refracción, como las rojas y verdes, podían producir, al mezclarse, una sensación de color indistinguible de la producida por una tercera luz pura, la amarilla en este caso, con un ángulo de refracción intermedio entre los de las luces originales.

A finales del siglo XVIII, ampliadas las observaciones iniciales de Newton, se averiguó que la visión del color era tricromática. Significa esto que la mayoría de los colores pueden conseguirse mezclando tres luces primarias; en todos los demás casos se consiguen mezclando dos de las luces primarias, como antes, y añadiendo la tercera primaria al color resultante. Muchas luces monocromáticas, o puras, pueden actuar como luces primarias. Ahora bien, todos los "juegos" de luces primarias constan de una luz de longitud de onda larga, otra de onda media y otra de onda corta, y cuando las tres primarias se mezclan a partes iguales producen la sensación de blanco. Por convención, las luces rojas, verdes y azules se consideran hoy "las" primarias.

El físico y médico inglés Thomas Young sugirió, en 1802, que la tricromía era un reflejo de la fisiología humana. Propuso que los colores que uno ve están determinados por el grado relativo de excitación de tres tipos de sensores. "Como es casi imposible imaginar que cada punto sensible de la retina contenga un número infinito de partículas, cada una de ellas capaz de vibrar en perfecta armonía con cada posible ondulación", apuntó, "es preciso suponer que dicho número está limitado, por ejemplo, a los tres colores primarios." Aunque se tardó, acabó por comprobarse que las ideas de Young eran correctas. Los tres tipos de sensores, los conos, tienen distintas sensibilidades lumínicas, solapadas. Así, los receptores del rojo y del verde absorben ambos la luz naranja, aunque el receptor del rojo lo hace más eficazmente.

Poco tiempo antes de que Young propusiera su teoría, un contemporáneo, John Dalton (el padre de la teoría atómica), consiguió estimular el interés por los estudios sobre las alteraciones en la visión de los colores. Sus trabajos, paralelos en el tiempo a los estudios sobre la visión normal de los colores, inspiraron en gran medida a éstos. En su primer artículo publicado por la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester, en 1794, Dalton confesaba que no veía los colores igual que los demás.

JEREMY NATHANS es profesor del departamento de genética y biología molecular y del departamento de neurociencia del instituto Howard Hughes, de la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins, desde 1987. Inició su formación superior en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, completándola con el doctorado en la Universidad de Stanford.

"La parte de la imagen que otros llaman rojo aparece ante mí poco más o menos como una sombra o deficiencia luminosa", decía. Añadió también que el naranja, amarillo y verde le parecían "lo que llamaría diferentes tonalidades de amarillo". Hoy día, las deficiencias en la capacidad para discriminar entre los colores en la región del rojo al verde del espectro ("discriminación rojo-verde"), anomalía que afecta aproximadamente al 8 por ciento de los hombres y al 1 por ciento de las mujeres caucásicas (raza blanca), reciben el nombre de daltonismo. Aunque son raros, también se conocen defectos en la capacidad para distinguir entre los colores de la parte azul del espectro, pero no nos entretendremos en ellos.

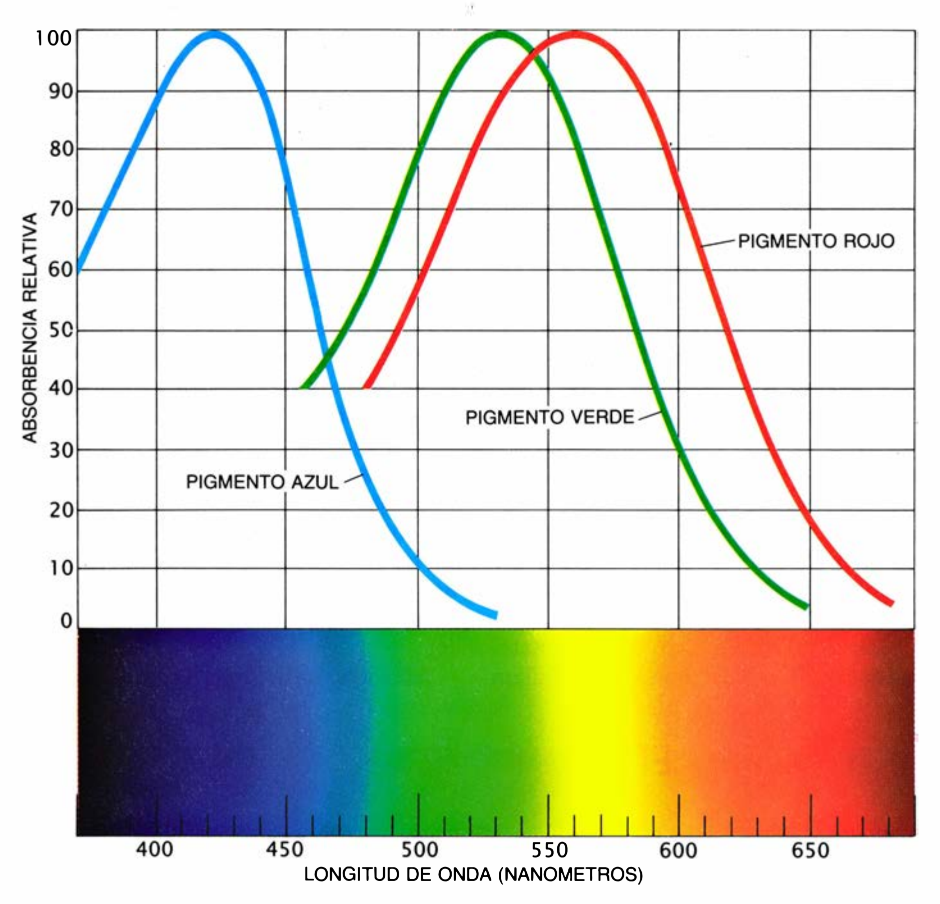
A mediados del siglo XIX, el físico escocés James Clerk Maxwell identificó dos tipos de daltonismo entre un grupo de personas a las que sometió a una prueba de detección de colores. De acuerdo con la teoría de los tres receptores de Young, Maxwell calculó las sensibilidades lumínicas de los tres receptores y dividió a sus individuos afectados en la percepción de los colores en dos grupos, según confundiesen colores que excitaban indistintamente a los receptores rojo y azul o verde y azul. Presumiblemente, los individuos que ven los colores con normalidad distinguen dichos colores por las diferencias en los niveles de excitación de sus receptores verdes y rojos, respectivamente; Maxwell dedujo, con buen criterio, que en uno de los grupos afectados faltaba el receptor verde y en el otro el rojo. A los incluidos en esos grupos se les suele denominar ahora dicrómatas verde$^-$ (verde menos) o rojo$^-$ (rojo menos).

Avanzado ya el siglo XIX, el matemático y físico inglés John William Strutt, más conocido por Lord Rayleigh, introdujo el anomaloscopio, un aparato que todavía hoy es fundamental en las pruebas de visión de los colores. El anomaloscopio proyecta tres luces monocromáticas distintas sobre una pantalla. Cuando se quiere estudiar la capacidad para discriminar colores de la parte roja-verde del espectro, se proyecta una luz verde y otra roja oscura sobre la mitad de una pantalla. La proyección se realiza de manera que los dos haces luminosos se mezclen en el mismo punto de la pantalla. Separadamente, sobre la otra mitad de la pantalla se proyecta una luz amarilla. Los individuos sometidos a la prueba deben ajustar las intensidades de las luces roja y verde y la de la luz amarilla, hasta que los colores de las dos mitades de la pantalla se emparejen.

El diseño del anomaloscopio se basa



1. ARCO IRIS, fenómeno que se produce cuando la luz del sol se descompone en sus colores constituyentes por la refracción que tiene lugar al atravesar las gotas de agua. El análisis realizado por Isaac Newton de este fenómeno y otro similar —la descomposición de la luz solar en un espectro de colores tras atravesar un prisma de cristal— fue el punto de partida de una investigación sobre la visión de los colores, que dura ya varios siglos. Sabemos ahora que el color que vemos depende de la activación relativa de tres tipos de pigmentos visuales, o proteínas que absorben luz, presentes en la retina. Las células coniformes que albergan a estos pigmentos traducen la luz absorbida en señales eléctricas y las transmiten después al cerebro para que allí reciban la interpretación adecuada.



2. CURVAS DE SENSIBILIDAD ESPECTRAL, en las que se muestra la sensibilidad de los tres pigmentos a la zona visible del espectro de luz. Las representaciones se basan en datos obtenidos por James K. Bowmaker, de la Universidad de Londres, y H. J. A. Dartnall, de la de Sussex. El pigmento azul es particularmente sensible a la región de longitud de onda corta del espectro. Los pigmentos verde y rojo son más sensibles a las longitudes de onda media y larga. No se ha conseguido aislar todavía los pigmentos. Bowmaker y Dartnall determinaron sus sensibilidades midiendo la luz absorbida por conos procedentes de cadáveres.

en el dato siguiente: las personas con visión normal para los colores poseen dos tipos de detectores de color —el rojo y el verde— que operan sobre la región roja-verde del espectro. (Los sensores del azul permanecen inmutados en las pruebas lumínicas.) Las personas que ven los colores con normalidad emparejan los colores cuando todos los sensores rojos y verdes absorben la misma cantidad de luz (el mismo número de fotones por segundo) de cada mitad de pantalla. Estos individuos consiguen emparejar ambos amarillos con unas proporciones de luz roja y verde reproducibles [*véase la figura 2*]. Por el contrario, los dicrómatas rojo⁻ y verde⁻ pueden hacerlo sólo con la luz roja o la verde, o con cualquier relación rojo-verde. Y pueden hacerlo porque las tres luces son detectadas por un único tipo de receptor; ajustando la intensidad de una de las luces, el dicrómata puede conseguir captar el mismo número de fotones a partir de las dos mitades de la pantalla.

Estas diferencias entre sujetos normales y dicrómatas rojos⁻ y verdes⁻ sirvieron a Rayleigh para seleccionar a los dicrómatas con su nuevo aparato. Tras realizar la prueba a sus amigos y parientes, identificó otros dos grupos de individuos con problemas en la visión del color. Igual que los individuos normales (y a diferencia de los dicrómatas), los sujetos en cuestión necesitaban mezclar las luces rojas y verdes para igualar el amarillo, pero lo hacían con unas intensidades lumínicas poco normales. Uno de los grupos necesitaba más verde y menos rojo; el otro grupo, lo contrario. Rayleigh concluyó que esos individuos, designados ahora como tricrómatas anómalos para el verde o para el rojo, portaban receptores para el verde o para el rojo con una sensibilidad espectral atípica.

A mediados del siglo XX este tipo de estudios psicofísicos, basados en la opinión de los individuos sometidos a prueba, constituyeron un fuerte apoyo a la teoría de los tres receptores de Young. Otros estudios sugerían que los conos de la retina eran los receptores. La comprobación experimental directa de estas ideas seguía constituyendo un reto desde el punto de vista técnico. Uno de los principales obstáculos estribaba en la dificultad para aislar los conos. Estas células están entremezcladas en la retina con otro tipo celular mucho más numeroso, los bastones, que son los fotorreceptores responsables de la visión en blanco y negro a media luz.

Como cabía esperar, no obstante, las dificultades se superaron con ingenio. En la década de los sesenta, Paul K. Brown y George Wald, de la Universidad de Harvard, y Edward F. MacNichol, Jr., William H. Dobelle y William B. Marks, de la Johns Hopkins, construyeron microespectrofotómetros que determinaban la absorbencia de una sola célula fotorreceptora. Obligado por el aparato, un haz luminoso de longitud de onda variable (esto es, que se puede cambiar la longitud de onda) atravesaba la región detectora del color de un cono; inducía también el tránsito de otro haz luminoso por una región distinta de la célula, repitiendo esta operación con diferentes longitudes de onda del espectro. La diferencia de intensidad de los haces emergentes en una longitud de onda específica señalaba la absorbencia de la región detectora de color para esa longitud de onda. Gracias a ese aparato se demostró que los conos procedentes de una retina humana, obtenidos en una autopsia, presentaban tres espectros de absorbencia distintos. Los espectros observados coincidían bastante con las sensibilidades predichas por los estudios psicofísicos.

Una representación de la fracción relativa de fotones absorbidos por segundo por cada tipo de cono, frente a las longitudes de onda del espectro visible, generaba tres curvas en campana. Los conos azules absorbían longitudes de onda entre 370 nanómetros (milmillonésima parte de un metro) y 530 nanómetros; eran más sensibles a longitudes de onda de 420 nanómetros. Los conos verdes y rojos, activos en la mayor parte del espectro, se muestran especialmente sensibles a longitudes de onda entre 450 y 620 nanómetros. Los conos verdes son más eficaces a 535 nanómetros y los rojos a 565.

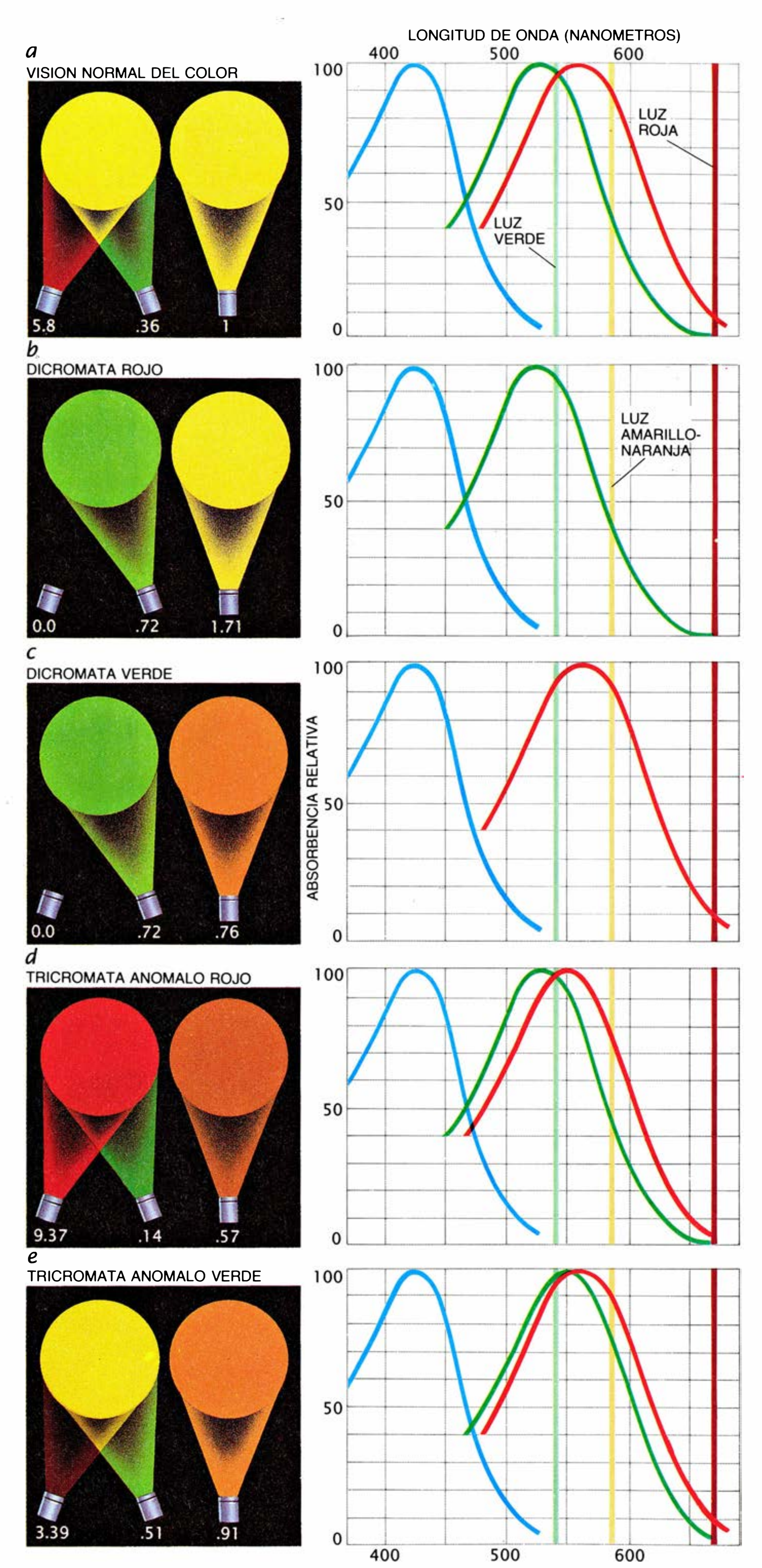
A principios de los años setenta surgieron nuevas pruebas que apoyaban la idea de que los dicrómatas carecían de una u otra clase de receptores. William A. H. Rushton, de la Universidad de Cambridge, dirigió un haz de luz de longitud de onda variable sobre los ojos de un grupo de dicrómatas y midió la luz reflejada por la retina, no la absorbida por ella. Demostró que algunas longitudes de onda específicas no eran

absorbidas por los dicrómatas. Más recientemente, James K. Bowmaker, de la Universidad de Londres, John D. Mollon, de Cambridge, y H. J. A. Dartnall, de Sussex, demostraron con un microespectrofotómetro que una retina obtenida de un dicrómata verde carecía de conos verdes.

Estas nuevas pruebas aportaron también algunas pistas sobre la base de la tricromacia anómala. Mediante técnicas psicofísicas, Rushton y, de forma independiente, Thomas P. Piantanida y Harry G. Sperling, de Texas, comprobaron que las curvas de sensibilidad espectral de los receptores rojos y verdes anómalos se situaban en el intervalo entre las curvas de absorbencia normales de los rojos y verdes.

Una vez establecida firmemente la existencia de tres clases distintas de conos, a principios de los años ochenta, David S. Hogness y el autor centraron su atención en las bases genéticas de la visión normal y anormal del color. Además de coadyuvar al aislamiento de los pigmentos, esperábamos añadir algo nuevo a los estudios de genética clásica que trazaban la herencia familiar de las anormalidades en la visión de los colores.

Tales estudios fundamentaban la antigua observación en virtud de la cual las deficiencias en la discriminación del rojo-verde abundaban más en los machos que en las hembras. Los análisis familiares indicaban que ciertos genes presentes en el cromosoma X (sexual) eran los responsables del defecto. Los

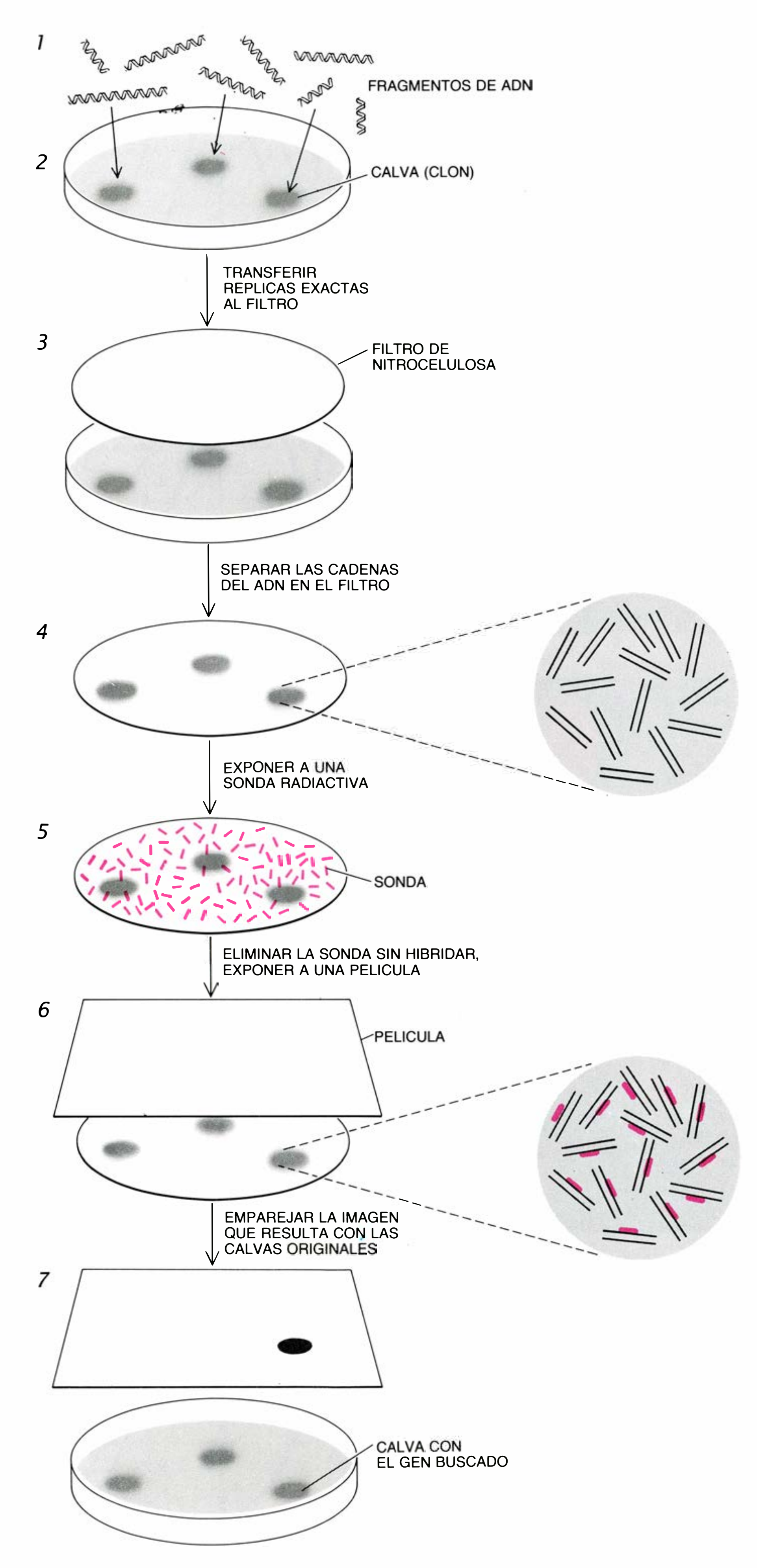


3. IGUALACION DE COLORES (*izquierda*), prueba utilizada para comprobar el grado de discriminación cromática en la gama rojo-verde, junto con las curvas de sensibilidad espectral de los respectivos individuos (*derecha*). El aparato con el que se realiza la prueba, un anomaloscopio de Rayleigh, superpone una luz roja y otra verde sobre una parte de una pantalla blanca, y sobre la otra mitad de la pantalla proyecta una luz amarillo-naranja. El individuo sometido a la prueba debe ajustar las intensidades de luz roja y verde, y la de la amarilla, hasta que las dos partes de la pantalla queden parejas, esto es, hasta que la cantidad de luz absorbida por cada tipo de pigmento de una y otra parte de la pantalla sea la misma. Los números que están debajo de cada fuente de luz indican las intensidades relativas. Los individuos normales (*a*) necesitan luz roja y verde para lograr el emparejamiento con el amarillo, realizándose el ajuste con alta intensidad de luz roja y baja de verde. (Los pigmentos rojos y verdes absorben la luz roja con menor eficacia que la amarilla; la verde, por el contrario, la absorben con mayor eficacia.) Las personas que carecen de pigmento rojo (*b*) o verde (*c*) se identifican porque son capaces de emparejar el amarillo sólo con la luz roja o la verde. (Mostramos únicamente el caso del verde.) Las personas que tienen pigmentos rojos (*d*) o verdes (*e*) con una sensibilidad espectral anormal requieren luz roja y verde para emparejar el amarillo, aunque, a diferencia de los individuos normales, precisan intensidades de luz roja y verde mucho mayores.

hombres cuyo único cromosoma X (heredado de su madre) porte el carácter no podrán distinguir el verde del rojo. Las hembras sólo se verán afectadas si heredan de cada progenitor un cromosoma con el carácter. Estos estudios señalaban también que las variaciones en la sensibilidad al azul dependían de un gen presente en un cromosoma no sexual. Había que comprobar la explicación más sencilla para estas pautas hereditarias: las alteraciones de la visión normal de los colores tenían su base en alteraciones hereditarias de los genes que determinaban los pigmentos de los conos. Cabía suponer que mutaciones en tales genes provocarían la pérdida de un pigmento funcional, o la producción de un pigmento con un espectro de absorbencia anormal.

Basamos nuestra estrategia experimental en el aislamiento de los genes responsables de la síntesis de los pigmentos y en la comparación de sus estructuras en personas normales y afectadas en la visión de los colores. A veces, es posible aislar genes a partir de la secuencia de aminoácidos de las proteínas que determinan, infiriendo después de ella la posible estructura de tales genes. Apenas se sabía nada sobre la estructura de los pigmentos cuando empezamos nuestro trabajo; nosotros ideamos una estrategia menos directa.

Para empezar, supusimos que los pigmentos de los conos y los de los bastones, la rodopsina, habían evolucionado de un pigmento visual ancestral común y que, por ello, los genes actuales tendrían probablemente secuencias de bases nucleotídicas similares. (Las



4. HIBRIDACION DE ADN, técnica que permitió al autor y sus colegas identificar los genes de la rodopsina humana —pigmento responsable de la visión (en blanco y negro) en condiciones de poca luz— y de los pigmentos de los conos. Se cortó el ADN bicatenario químicamente (*1*), se separaron los fragmentos por tamaños y se clonaron en virus bacterianos crecidos sobre un césped de bacterias. Cada virus se replica hasta formar una calva, o zona de multiplicación vírica (*2*). Se colocó un filtro de nitrocelulosa sobre la caja, de forma que una muestra de cada calva quedase adherida a dicho filtro (*3*). El ADN adherido al filtro se trató químicamente para separar sus cadenas (*4*) y se expuso a una sonda marcada radiactivamente (*rojo*): ADN monocatenario del gen de rodopsina de bóvido (*5*). Si la sonda era estructuralmente similar a los genes de los pigmentos humanos, como así se esperaba, debería hibridar (unirse) con los genes de los pigmentos. Para comprobar si la sonda quedaba unida, los filtros se cubrieron con una película fotográfica (*6*). En los sitios donde se produjo la unión aparecieron puntos negros (*7*), indicativos de que la sonda radiactiva habíase hibridado. Los investigadores identificaron después los clones que contenían los genes de los pigmentos comparando los puntos señalados de la película con las calvas correspondientes (*abajo*).

bases son cuatro unidades químicas, cuya secuencia a lo largo de la doble hélice de ADN determinan la información.) Si conociésemos la estructura del gen de la rodopsina, pensamos, podríamos saber algo sobre la estructura de los genes de los pigmentos de los conos. Por aquel entonces no se había aislado todavía ni la rodopsina humana ni su gen, aunque algunos investigadores sí lo habían conseguido con la rodopsina bovina, a partir de retina de vaca. Por fortuna para nosotros, Yuri A. Ovchinnikov y sus colegas, del Instituto M. M. Shemyakin de Química Biorgánica, en Moscú, y Paul A. Hargrave y sus colaboradores, de la Universidad del Sur de Illinois, descifraron la secuencia de aminoácidos de la proteína. Esta información sería nuestro trampolín para identificar los genes de los pigmentos de los conos.

Nuestro proyecto era aislar el gen de la rodopsina de vaca y utilizarlo después como sonda para identificar el gen de la rodopsina humana y los genes de los pigmentos de los conos. Utilizaríamos una técnica, la hibridación de ADN, que basa su estrategia en la capacidad de que posee la molécula de ADN unicatenario de formar doble hélice estable con una segunda cadena, si las secuencias de bases nucleotídicas en ambas cadenas son complementarias. En concreto, la base adenina siempre se empareja con timina, y guanina siempre con citosina.

La técnica de la hibridación consta de muchos pasos; pero, en esencia, lo que hace el investigador es trocear químicamente la molécula bicatenaria de ADN que se va a sondear, y multiplicar, a través de clonación, dicha colección de fragmentos. Una muestra de cada clon se somete a un tratamiento para separar las cadenas del ADN; luego se incuba con una sonda radiactiva, que es otro segmento de ADN unicatenario, complementario al gen que uno espera identificar. Si todo va bien, la sonda se une de forma estable a su secuencia complementaria, revelando la presencia del gen buscado [*véase la figura 4*].

Normalmente, para conseguir la sonda necesaria para nuestros propósitos —la identificación del gen de la rodopsina bovina— tendríamos que haber obtenido todas las posibles secuencias de bases capaces de determinar la secuencia conocida de aminoácidos de la rodopsina. A continuación, habría que probar todas las sondas creadas de acuerdo con esta estrategia. Afortunadamente, nos ahorramos buena parte de este largo proceso, ya que había una sonda capaz de identificar el gen de la rodopsina bovina. H. Gobind Khorana, Daniel D. Oprian y Arnold C. Satterthwait, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Meredithe L. Applebury y Wolfgang Baehr, de la Universidad Purdue, habían conseguido identificar una secuencia de ADN que se hibridaba eficazmente con las moléculas de ARN mensajero específicas de la rodopsina de bóvidos. (El ARN mensajero es la molécula unicatenaria que porta la información del ADN desde el núcleo hasta el citoplasma, donde dirige la producción de la proteína que determina. El ARN es casi idéntico a la cadena determinante del ADN a partir del cual se transcribe.) Tomando como referencia la secuencia de ADN de Khorana y Applebury y sus colegas, sintetizamos una sonda y la utilizamos para identificar el gen de la rodopsina de bóvidos.

En la siguiente etapa de nuestro plan de trabajo, utilizamos una cadena del recién identificado gen de la rodopsina de bóvido como sonda para buscar los genes de la rodopsina humana y de los pigmentos implicados en la visión del color. La sonda se unía fuertemente a un solo segmento de ADN humano, que más tarde resultó ser el gen de la rodopsina humana. Nuestra sonda se hibridaba también, aunque no de una manera tan intensa, con otros segmentos de ADN. Cuando determinamos sus secuencias de nucleótidos, comprobamos que tales segmentos contenían regiones determinantes homólogas con las de los genes de las rodopsinas humana y de bóvidos. El análisis de las secuencias de aminoácidos de las proteínas que determinaban demostraba que tales moléculas se parecían a la secuencia de la rodopsina; eran casi idénticas en un 40 por ciento.

Naturalmente, sospechamos que los segmentos de ADN que hibridaban con nuestra sonda constituían los tres genes de los pigmentos de los conos, pero queríamos tener más pruebas para estar seguros de ello. Por ejemplo, esperábamos que el ARN mensajero correspondiente a las secuencias que se unían a la sonda sólo se encontrase en la retina del ojo, único lugar donde se producen los pigmentos visuales y, por tanto, los ARN de dichos pigmentos. Efectivamente, la retina producía ARN correspondiente a ADN que se unía con la sonda.

Para comprobar si nuestros descubrimientos estaban en consonancia con los obtenidos en los estudios de genética clásica, lo que daría más consistencia a nuestra creencia de que habíamos encontrado los genes de los pigmentos de la visión, determinamos la localización cromosómica de los segmentos de ADN que habíamos detectado con nuestra sonda. En colaboración con Thomas B. Shows y Roger L. Eddy, del Instituto Rosewell Park Memorial, de Buffalo, encontramos que dos de los tres genes que mostraban una señal débil de hibridación residían exactamente en la región del cromosoma X donde los análisis clásicos situaban la fuente de los defectos en la discriminación rojo-verde. Concluimos, por tanto, que esos genes determinaban los pigmentos rojos y verdes; estudios posteriores que realizamos con Piantanida lo confirmaron. El tercer gen, que ahora sabemos determina el pigmento azul, se alojaba en el cromosoma 7, lo que confirmaba la sospecha de que la visión del azul estaba determinada por un cromosoma no sexual.

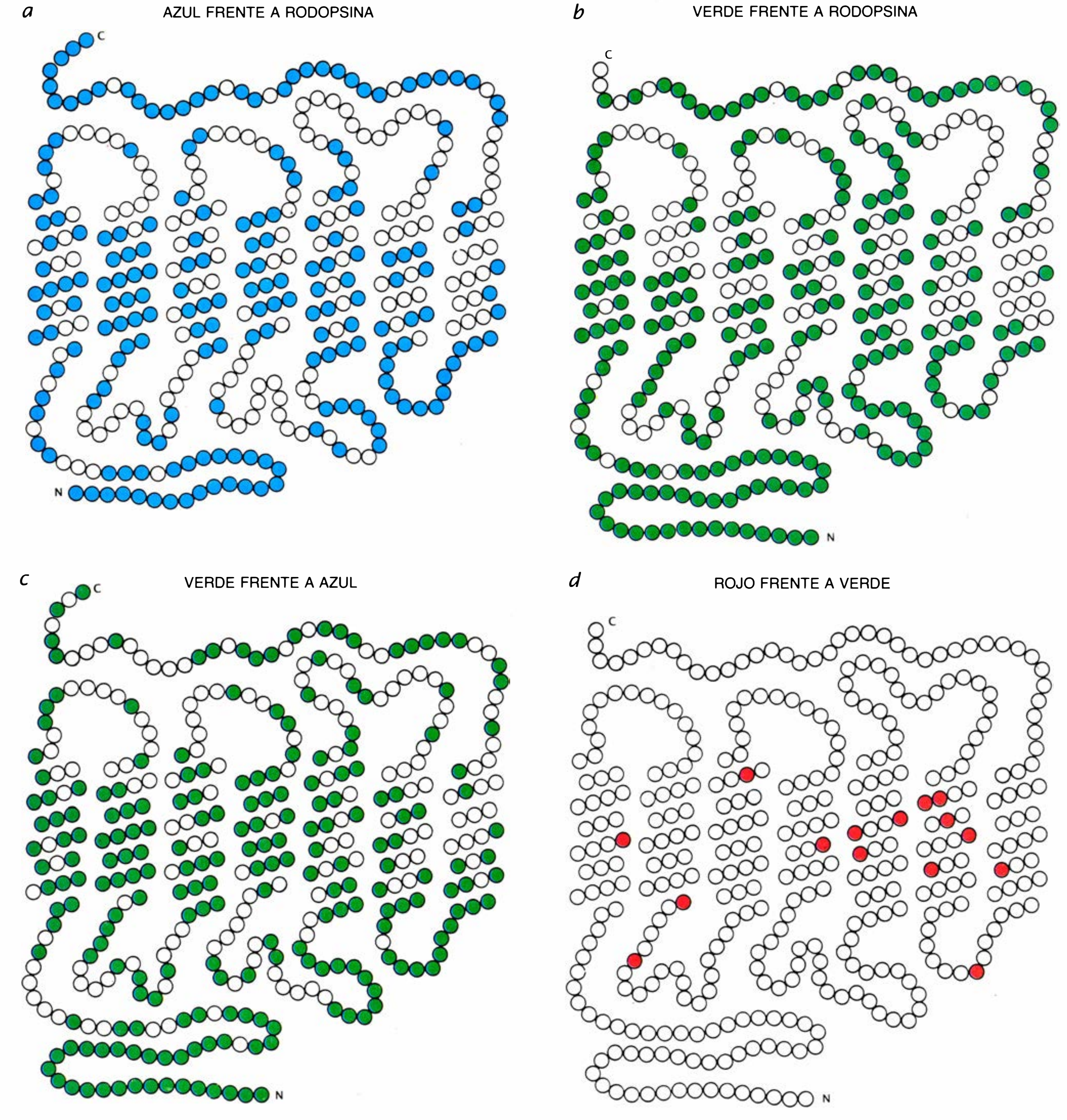
La significativa homología entre el gen de la rodopsina y los tres genes de los pigmentos de los conos sugiere que los cuatro han evolucionado a partir del mismo ancestro. Las pruebas disponibles apoyan la idea según la cual, a partir de un gen primordial, se originaron andando el tiempo otros tres: el gen de la rodopsina, el gen del pigmento azul y un tercer gen que determinaba un pigmento sensible a la luz de la parte rojo-verde del espectro. Este tercer gen se duplicó no hace mucho, originando un gen para el pigmento rojo y otro para el verde.

Pensamos que los genes de los pigmentos rojos y verdes son producto de una duplicación reciente porque muestran un alto grado de homología: el 98 por ciento de su ADN es idéntico, lo que indica que han tenido muy poco tiempo para divergir. La idea de que el evento tuvo lugar no hace mucho, al menos en términos evolutivos, está apoyada por los descubrimientos de Gerald H. Jacobs, de la Universidad de California en Santa Barbara, compañero de Bowmaker y Mollon. Ellos han demostrado que los monos del Nuevo Mundo (América del Sur) tienen un solo gen de pigmento visual en el cromosoma X, mientras que los monos del Viejo Mundo (Africa), más próximos a la especie humana, poseen dos genes de pigmentos visuales en ese cromosoma. La adición del segundo gen en el cromosoma X debe haber ocurrido después de la separación de América del

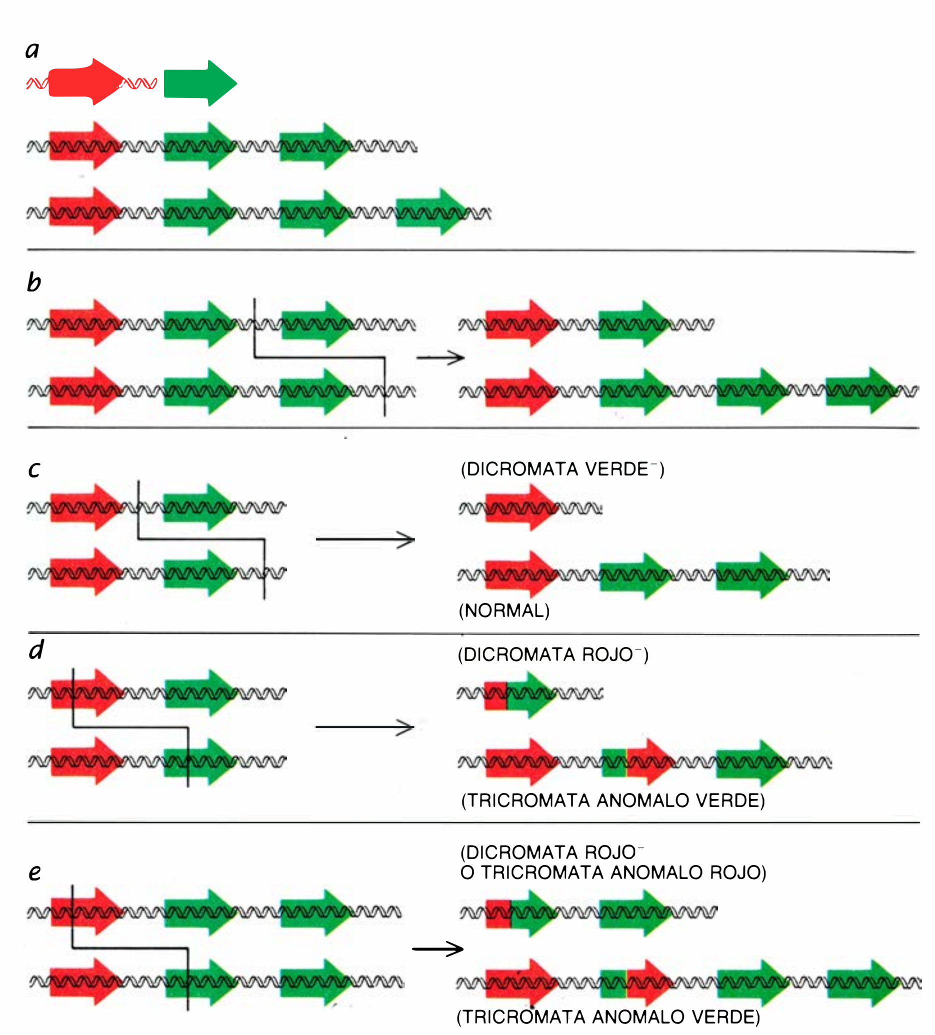
Sur y Africa, y, por tanto, del fondo común de genes de los monos del Nuevo y Viejo Mundo, hace unos 40 millones de años.

Los descubrimientos descritos hasta el momento no fueron del todo inesperados, pero sí lo fue el que se indica a continuación. Cuando estudiábamos los genes de los pigmentos visuales de los cromosomas X de 17 de nuestros colegas varones, todos los cuales tenían una visión normal para los colores, encontramos que el gen del pigmento rojo estaba siempre presente como copia única, no así el otro gen, el del pigmento verde, del que se encontraban una, dos y hasta tres copias. La existencia de múltiples copias resultaba sorprendente, ya que un gen de pigmento verde debe ser suficiente para ver los colores con normalidad.

Experimentos recientes sugieren que los genes de los pigmentos visuales se localizan uno tras otro en el cromosoma X, y que esta disposición en tándem determina la variabilidad numérica de los genes. Los genes en tándem, cuando son similares, tienden a sufrir cambios en el número de copias durante la meiosis, proceso de división celular que rinde esperma y óvulos. Las células suelen contener versiones algo distintas de cada cromosoma; durante la meiosis, los cromosomas se emparejan y recombinan, esto es, intercambian segmentos. Normalmente, el intercambio es parejo, de tal forma que los cromosomas ni pierden ni ganan genes.



5. COMPARACIONES ESTRUCTURALES de los cuatro pigmentos visuales en razón de sus secuencias nucleotídicas. Se aprecia que la rodopsina y los pigmentos tienen secuencias de aminoácidos similares. (Cada círculo de color representa una diferencia de aminoácidos.) Los pigmentos rojos y verdes son más parecidos; de hecho, son casi idénticos (*d*). Cuando las moléculas poseen longitud diferente, se representa la más larga, coloreándose la ''prolongación''.



6. INTERCAMBIO DE MATERIAL GENETICO entre cromosomas X normales, portadores de los genes de los pigmentos rojo y verde (*flechas de color*). Tales intercambios pueden originar situaciones normales o anormales en cuanto a la capacidad para discriminar colores en la región rojo-verde. Los cromosomas X de individuos normales portan un gen normal para el pigmento rojo y uno, dos o hasta tres genes para el pigmento verde (*a*). Esta variabilidad es normal, y puede surgir fácilmente cuando un cromosoma con un gen de pigmento rojo y dos de pigmento verde pierde uno de estos últimos, que gana su pareja (*b*). La dicromacia y tricromacia anómala suelen tener su origen en los intercambios genéticos que determinan la pérdida de un gen de pigmento (*c*) o la creación de un gen híbrido, con parte de un gen de pigmento verde y parte de uno de pigmento rojo (*d*, *e*). La sensibilidad luminosa de un pigmento híbrido depende del punto de recombinación en el interior del gen híbrido. (La ilustración ha sido recreada por George V. Kelvin.)

Ocasionalmente, sin embargo, dos segmentos con alto grado de homología pueden recombinar erróneamente, en un proceso que se denomina recombinación homóloga desigual. Cuando se da este caso, un cromosoma puede ganar una o más copias de un gen, a expensas del otro cromosoma; puede ocurrir también que los dos cromosomas intercambien secuencias de genes parecidos, aunque distintos. Los cromosomas que resultan se transmiten a los espermatozoides o a los óvulos.

Es fácil imaginar cómo la recombinación homóloga desigual ha podido originar las distintas configuraciones de genes para los pigmentos verdes en personas normales para la visión de los colores. Considérense dos cromosomas emparejados, cada uno de ellos con un gen de pigmento rojo junto a dos genes de pigmentos verdes. Si uno de los genes de pigmento verde de uno de los cromosomas se recombina con el otro cromosoma durante la meiosis, una de las células hijas podría quedar con un cromosoma que portase un gen de pigmento rojo y otro verde, y la otra célula con un gen de pigmento rojo y tres genes de pigmento verde, la misma situación observada en algunos de nuestros casos de individuos normales para la visión de los colores. Hay un solo gen de pigmento rojo en cada caso, porque este gen se halla situado muy en el extremo del cúmulo de genes responsables de los pigmentos. Es muy improbable que un gen en esa situación se duplique (o pierda) por recombinación homóloga.

La recombinación homóloga desigual parece ser responsable no sólo de la duplicación de los genes de los pigmentos verdes en personas con visión normal de los colores, sino también de la gran mayoría de las deficiencias que afectan a la discriminación rojo-verde. En colaboración con Piantanida estudiamos el ADN de 25 hombres que, según la prueba anomaloscópica de Rayleigh, estaban afectados en la discriminación rojo-verde. Todos menos uno presentaban configuraciones anormales de los genes de los pigmentos, producidas como consecuencia de procesos de recombinación homóloga desigual.

¿Qué configuraciones génicas producen dicrómatas rojo$^-$ o verde$^-$, y cuáles tricrómatas anormales? Encontramos que la mayoría de los dicrómatas verde$^-$ (los que aparentemente carecían del receptor del verde) habían perdido todos los genes para los pigmentos verdes. En algunos dicrómatas verde$^-$, sin embargo, el gen del pigmento verde había sido sustituido por un gen híbrido, en el que las secuencias cercanas al comienzo del gen procedían de un gen de pigmento verde, y el resto de la secuencia de un gen de pigmento rojo. Aparentemente, el cromosoma con el gen híbrido es resultado de un hecho de recombinación entre parte de un gen normal para pigmento verde y parte de un gen para pigmento rojo.

¿Por qué el gen híbrido no determina un receptor verde funcional? Según parece, las secuencias de ADN próximas al extremo inicial de un gen normal o híbrido determinan el tipo celular donde el gen será activo, y la parte más distal de la secuencia el tipo de pigmento producido. Ello determinará la producción de pigmento rojo en células que normalmente serían conos verdes y, por tanto, que funcionen sólo como receptores rojos.

Entre los hombres en los que la prueba del anomaloscopio de Rayleigh revelaba la ausencia del receptor rojo (dicrómatas rojo$^-$), la gran mayoría no había perdido toda la secuencia correspondiente al pigmento rojo. Ocurría que el único gen para el pigmento rojo habíase sustituido por un híbrido en el que sólo la secuencia inicial era de un gen de pigmento rojo. Supusimos que este híbrido determinaba la producción de pigmento verde en células que normalmente deberían ser conos rojos, y así los portadores del gen poseerían conos verdes y ninguno rojo.

Todos los individuos con tricromacia anómala tenían al menos un gen híbrido, además de algunos o todos los ge-

nes de pigmentos visuales normales. Nuestra hipótesis es que, en estos individuos, los genes híbridos determinan proteínas que poseen sensibilidades espectrales anómalas. Nuestros descubrimientos sugieren que pueden existir muchos pigmentos anormales, y que la sensibilidad espectral de cada uno de ellos viene determinada por el sitio donde se ha producido la recombinación en el gen híbrido. Mientras mayor sea la fracción del híbrido derivada del gen para el pigmento verde, más parecido al verde será el pigmento producido; de la misma manera, si una fracción grande del híbrido deriva del gen del pigmento rojo, el pigmento producido será más parecido al rojo. Si tales hipótesis son ciertas, nuestros datos explicarían las observaciones psicofísicas que indican que los receptores anómalos absorben con mayor eficacia las longitudes de onda comprendidas en el intervalo que queda entre las longitudes de onda absorbidas más eficazmente por los conos rojos y verdes normales.

Quedan aún algunas preguntas estimulantes sobre el papel de conos y pigmentos en la visión normal de los colores. ¿A qué se debe el espectro de absorbencia característico de los pigmentos visuales? ¿Cómo determina cada célula fotorreceptora qué pigmento visual debe producir? ¿Cómo se forman durante el desarrollo las conexiones entre células fotorreceptoras y neuronas? Para encontrar las respuestas a estas y otras preguntas parecidas, las anormalidades hereditarias que afectan a la visión de los colores en la especie humana son un regalo, una ventana excepcional por donde asomarse al funcionamiento interno del ojo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THREE-PIGMENT COLOR VISION. Edward F. MacNichol, Jr., en *Scientific American*, vol. 211, n.º 6, págs. 48-56; diciembre de 1964.

THE MOLECULAR BASIS OF VISUAL EXCITATION. George Wald en *Nature*, vol. 219, n.º 5156, págs. 800-807; 24 de agosto de 1968.

MOLECULAR GENETICS OF HUMAN COLOR VISION: THE GENES ENCODING BLUE, GREEN, AND RED PIGMENTS. Jeremy Nathans, Darcy Thomas y David S. Hogness en *Science*, vol. 232, n.º 4747, págs. 193-202; 11 de abril de 1986.

MOLECULAR GENETICS OF INHERITED VARIATION IN HUMAN COLOR VISION. Jeremy Nathans, Thomas P. Piantanida, Roger L. Eddy, Thomas B. Shows y David S. Hogness en *Science*, vol. 232, n.º 4747, págs. 203-210; 11 de abril de 1986.

Gigantescas cataratas oceánicas

Las cataratas submarinas, cuyo salto supera el de la mayor cascada y su caudal el de cualquier río, desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la química y el clima de las profundidades oceánicas

John A. Whitehead

Los aficionados a trivialidades saben que las cataratas del Angel, en Venezuela, con una altura de poco menos de un kilómetro, constituyen el salto de agua más alto del mundo, y que las cataratas de Guaira, a lo largo de la frontera entre Brasil y el Paraguay, llevan el mayor caudal medio: aproximadamente 13.000 metros cúbicos por segundo. Pero los aficionados a trivialidades no se han sumergido bajo el estrecho de Dinamarca. Allí, una inmensa cascada de agua −una catarata oceánica gigante− transporta cinco millones de metros cúbicos de agua por segundo, a lo largo de una caída de 3,5 kilómetros, dejando enanas a las cataratas del Angel en altura y a las de Guaira en caudal. El mismo río Amazonas, que vierte 200.000 metros cúbicos de agua en el Atlántico cada segundo, palidece ante la catarata del estrecho de Dinamarca. Y mientras que las mayores cataratas continentales constituyen un componente sin importancia en el balance climático terrestre, las cataratas gigantes desempeñan un papel vital para determinar la temperatura y la salinidad de las profundidades oceánicas.

Los oceanógrafos han comenzado a investigar con seriedad las cataratas oceánicas en los últimos 20 años. Esos accidentes son un resultado directo del proceso de convección, el transporte de calor por el movimiento de masas considerables de fluido. Podemos asociar el océano a una artesa de agua de escasa profundidad, que está expuesta al Sol por un extremo (los trópicos), pero no por el otro (las altas latitudes) [*véase la figura 2*]. El agua fría cerca del polo es la más densa; por tanto, tiende a descender en forma de corriente convectiva hacia el fondo de la artesa. Desde allí se extiende hacia las latitudes templadas, desplazando encima de ella el agua más caliente. Esta, por tanto, comienza a ascender en un suave afloramiento, que ocurre, tal se cree, en casi todas partes del océano. Como las capas más calientes impiden el movimiento hacia arriba de las más frías del fondo −de igual manera que la inversión térmica de Los Angeles aprisiona aire frío bajo aire cálido−, el afloramiento se caracteriza por una extrema lentitud. Al mismo tiempo, el agua fría se calienta por contacto con las capas más altas de encima.

El océano se encuentra en equilibrio térmico. Por consiguiente, el calor que fluye hacia arriba en este proceso debe ser igual al calor que fluye hacia abajo. Por ser la convección un mecanismo de transporte de calor, de suma eficacia, las corrientes convectivas hacia abajo no necesitan tener una sección muy grande para compensar el calor intercambiado por el calentamiento, extendido a todo el océano, de las aguas profundas. Las estrechas corrientes de agua fría en subsidencia anuncian las cataratas oceánicas reales.

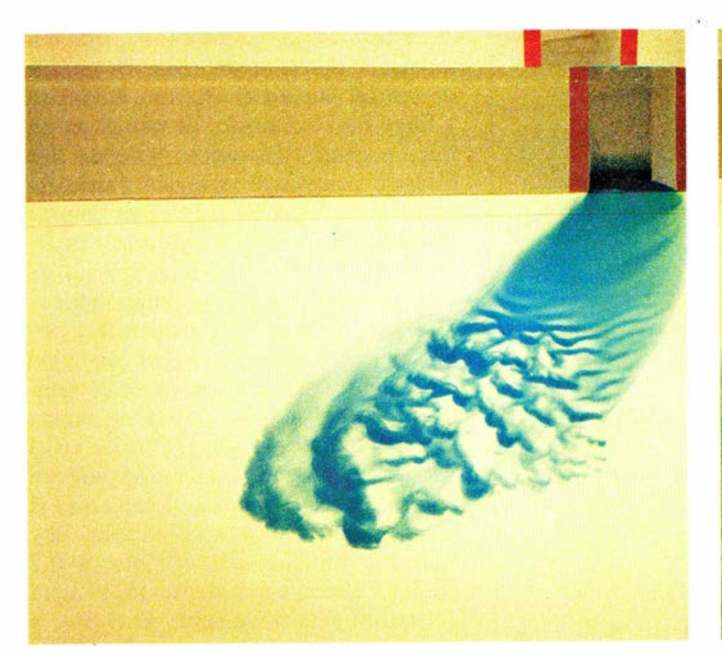
Es fácil estimar el tiempo a lo largo del cual tiene lugar el afloramiento. Si la artesa oceánica presenta un volumen de aproximadamente 3×10^{17} metros cúbicos, y se está alimentando por una corriente de agua fría de cinco millones de metros cúbicos por segundo, haría falta 2000 años para llenar la artesa. Si esta última tuviera cinco kilómetros de profundidad y no hubiera intercambio de calor entre las capas cálidas superiores y las capas frías de abajo, el nivel del agua fría ascendería a razón de dos a tres metros por año. Aunque esto es una primera estimación, corresponde aproximadamente a la tasa de afloramiento que se cree tiene lugar en el océano real.

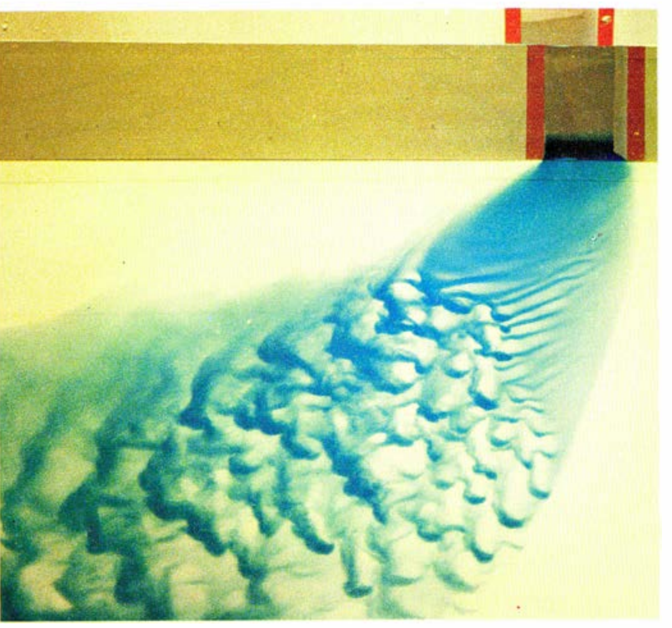
Naturalmente, el océano real no es tan simple como la artesa de agua; posee accidentes topográficos que lo dividen en un conjunto de grandes cuencas. Supongamos que la artesa oceánica estuviera dividida por una colina o una cresta en una cuenca polar y otra ecuatorial. El agua fría que se hunde en el polo puede ahora caer sólo dentro de la cuenca polar. Para alcanzar latitudes más bajas, el agua fría debe primero ascender por encima de la cresta; lo hace mediante el afloramiento gradual antes explicado. Durante el proceso, el agua se calienta por contacto con las capas más cálidas de arriba, pero, al ser muy baja la conductividad térmica del agua, el intercambio de calor es mínimo y el cambio de temperatura no es grande.

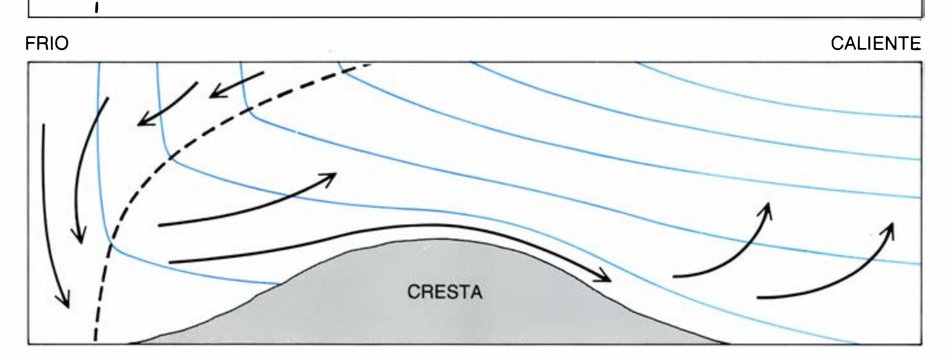
Consiguientemente, la temperatura del agua a la profundidad de la cresta en la cuenca polar es más baja que la temperatura a la misma profundidad en la cuenca ecuatorial. El agua polar es, por tanto, más densa que el agua ecuatorial, de modo que cae a lo largo de la cresta, desplazando el agua más caliente. Me referiré a la corriente resultante sobre la cresta como catarata oceánica. Al fluir desde la cuenca polar hacia la cuenca ecuatorial, la catarata arrastra agua cálida que encuentra en la pro-

JOHN A. WHITEHEAD es jefe de investigación en el departamento de oceanografía física de la Institución Oceanográfica Woods Hole. Se formó en las universidades de Tufts y Yale. Es miembro de la Sociedad Americana de Física. Sus intereses se centran en estudios analíticos y de laboratorio de mecánica de fluidos en los océanos, atmósferas e interiores planetarios. En su tiempo libre, Whitehead toca el trombón en la banda municipal de Falmouth, Massachusetts, que dirige su esposa Linda.

1. CATARATA DE LABORATORIO, creada introduciendo un chorro de agua salada en un tanque giratorio de agua dulce. El agua salada, más densa, coloreada aquí en azul, se va hacia el fondo. A medida que desciende por el suelo inclinado del tanque, forma olas y se mezcla, por turbulencia, con el agua circundante. La fuerza de Coriolis, debida a la rotación del tanque, hace que la catarata vire a su derecha. La diferencia de salinidad impulsa también a la catarata que sale de Gibraltar al Atlántico Norte.







2. LA CONVECCION impulsa la mayoría de las cataratas oceánicas; así se demuestra en un recipiente de agua cuando se calienta por un extremo y se enfría por el otro (*arriba*). El agua fría del "polo" se va rápidamente al fondo del recipiente (*flechas*) y se extiende hacia el "ecuador". Allí encuentra capas de agua más caliente encima. Esta inversión de temperatura impide que el agua fría ascienda rápidamente; antes bien, se calienta por contacto con las capas más calientes y asciende a razón de un metro por año en el océano. La catarata se forma cuando, en el fondo del recipiente, se introduce una cresta (*abajo*). El agua de la cuenca polar está más fría, y por tanto es más densa, a la altura de la cresta, que el agua de la cuenca ecuatorial; el efecto se manifiesta por la subida de las isotermas, o líneas de igual temperatura (*trazo continuo*), en la parte izquierda. El agua polar se derrama, sobre la cresta, hasta el fondo de la cuenca ecuatorial. Este rápido descenso, acompañado a veces de intercambio turbulento, constituye un modelo de catarata oceánica.

fundidad de la cresta, o por encima, y la transporta consigo hacia abajo, hasta el fondo de la segunda cuenca. Además, como la catarata fluye hacia abajo, con frecuencia experimenta mezcla turbulenta con el agua circundante, corriente abajo. El resultado neto del arrastre y mezcla es que la temperatura del agua en el fondo de la cuenca ecuatorial iguala —o incluso supera— a la temperatura del agua en la profundidad de la cresta en la cuenca polar.

El estudio de las cataratas en el mundo real debe tener en consideración las numerosas cuencas del océano. Ciertos factores que complican la cuestión, y que abordaremos luego (fuerza de Coriolis y rozamiento), intervienen también en la descripción; resulta de ello que las trayectorias de algunas cataratas no están orientadas de norte a sur, ni terminan en el Ecuador. Pese a lo cual, este sencillo modelo explica la mayor parte de los hechos observados: las cataratas de agua fría y densa fluyen desde las cuencas polares hacia las ecuatoriales. En cada fase del proceso, el agua se calienta por arrastre y mezcla. Con ello, la temperatura del fondo de las cuencas oceánicas aumenta hacia el Ecuador.

Las cataratas oceánicas gigantes se producen a grandes profundidades y en zonas restringidas; no son fáciles de estudiar. Aunque los oceanógrafos aludieron a su presencia ya en la década de los setenta del siglo pasado, hubo que esperar al decenio de 1960 para que se hiciera posible la investigación a fondo del fenómeno. El avance decisivo llegó cuando los transistores sustituyeron los tubos de vacío, produciendo equipos electrónicos capaces de soportar el ser lanzados por la borda.

Una forma de estudiar las cataratas consiste en examinar una tira oceánica, extendida de norte a sur, que incluya la región sospechosa de formación de aguas frías: la región donde el agua fría desciende [*véase la figura 4*]. Se traza luego un conjunto de isotermas, o curvas de igual valor de la temperatura. La catarata transporta agua fría hacia abajo de una cresta; si hubiera, pues, una catarata, la isoterma que corresponde justamente a encima mismo de la profundidad de la cresta estará a nivel en el lado que mira corriente arriba de la cresta, pero descenderá bruscamente en el lado que mira corriente abajo. El agua más fría que se halle por debajo mismo de la profundidad de la cresta no fluirá sobre ésta. En consecuencia, las isotermas que representan su temperatura aparecerán en la cuenca corriente arriba, pero no en la cuenca corriente abajo.

La catarata de Río Grande, que comienza a aproximadamente 20 grados de latitud Sur en el Océano Atlántico y fluye hacia el norte, proporciona un buen ejemplo. El propio Alto de Río Grande constituye la cresta para esta catarata: se halla a 4000 metros de profundidad bajo el nivel del mar. La isoterma de la temperatura potencial de cero grados Celsius está a una profundidad algo mayor. (La temperatura potencial es la temperatura real corregida del efecto de la presión en la profundidad oceánica.) Por tanto, la cresta bloquea ese curso, que se origina en el Antártico, impidiéndole derramarse por la Cuenca Brasileña, situada más al norte. Allende la cima de la cresta, hay agua ligeramente más caliente, a 0,2 grados Celsius, y más densa que el agua del norte; ésta fluye sobre la cresta, y la isoterma de 0,2 grados desciende aproximadamente un kilómetro, hasta el fondo de la Cuenca Brasileña.

Las isotermas de 1,0 y 1,4 grados revelan una segunda catarata, más hacia el norte, donde la Meseta Abisal de Ceara separa la Cuenca Brasileña de la Cuenca del Atlántico Norte. Esta meseta, situada cerca del Ecuador, impide que el agua a 1,0 grados C de la Cuenca Brasileña se derrame hacia la Cuenca del Atlántico Norte. Por otra parte, el agua a 1,4 grados C se encuentra encima de la cresta, que se supone situada a unos 4 grados de latitud Norte. Hacia el sur la isoterma de 1,4 grados C está relativamente a nivel, pero hacia el norte de la cresta desciende más de 2000 metros y, al parecer, acaba en el suelo de la parte más profunda de la Cuenca del Atlántico Norte. Forma allí el agua antártica de fondo, así llamada por su origen meridional, del Atlántico Norte. Que la isoterma de 1,4 grados C termine bruscamente refleja, probablemente, el fenómeno siguiente: durante su descenso, el agua que cae se mezcla con agua circundante más caliente, su temperatura asciende y la isoterma desaparece.

La delineación de la isoterma de dos grados revela la tercera gran catarata del Atlántico, el derrame del estrecho de Dinamarca. La corriente que fluye a través del estrecho de Dinamarca (situado en realidad entre Groenlandia e Islandia) circula de norte a sur, en sentido opuesto a la corriente de agua antártica de fondo en las cataratas que hemos explicado antes. Una vez que la corriente cruza la cresta, llamada Alto de Groenlandia-Islandia, desciende por una catarata de 200 metros de profundidad y 200 kilómetros de anchura; con 1000 kilómetros corriente abajo,

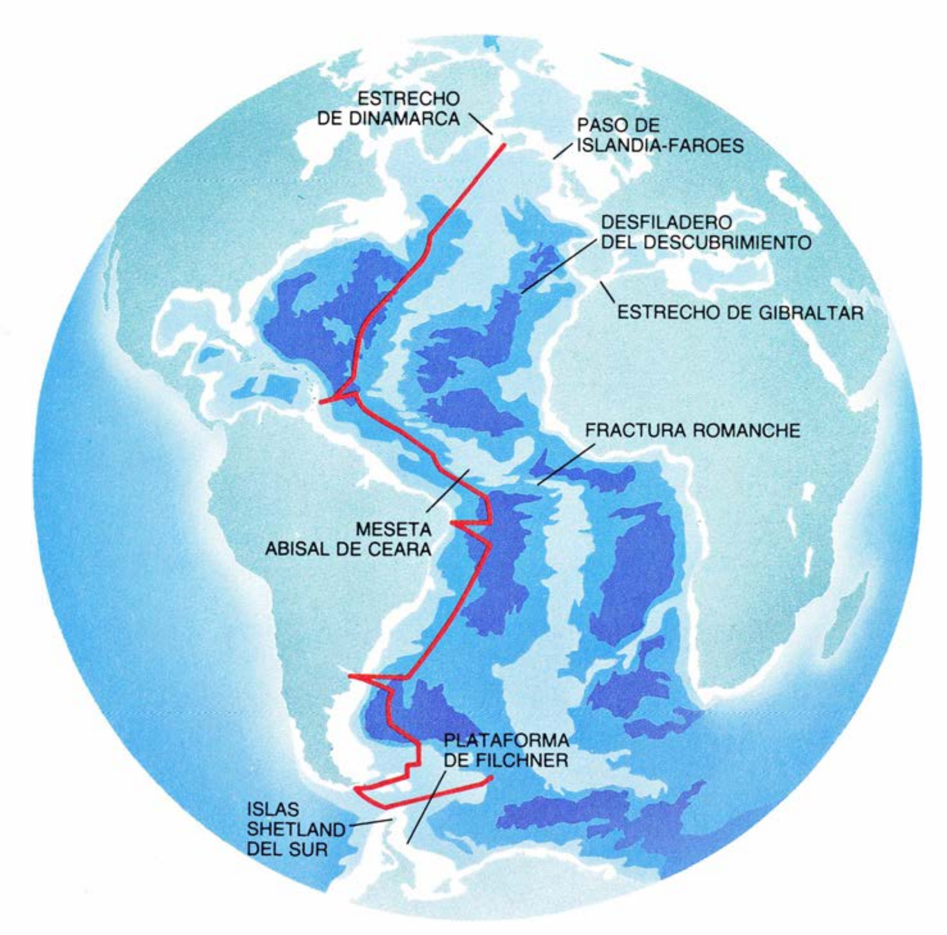
alcanza una profundidad de unos 3500 metros y forma las aguas profundas del Atlántico Norte. Durante su descenso de 3,5 kilómetros, el agua en caída puede mezclarse con otra más cálida, aumentando su temperatura por encima de la del agua antártica de fondo. En cualquier caso, el agua profunda del Atlántico Norte no es tan densa como la antártica de fondo; forma una capa bien diferenciada por encima de ella.

Los termómetros no son el único medio con el cual los oceanógrafos pueden investigar las cataratas. Los isótopos radiactivos disueltos en agua de mar constituyen otro medio eficaz para seguir las trayectorias de esas corrientes submarinas. El tritio, isótopo radiactivo del hidrógeno, con una vida media de 12,5 años, se produjo, en cantidades muy por encima de los niveles naturales de fondo, durante las pruebas de bombas nucleares en la atmósfera, en el decenio de 1950 y a comienzos de los años sesenta. La mayor parte del tritio se desprendió en el hemisferio Norte y penetró en el océano en forma de agua tritiada, o pesada. Al finalizar en 1963 las pruebas en superficie, esa fuente de tritio desapareció. Desde entonces, los niveles atmosféricos de dicho isótopo han disminuido sin cesar. Así, un gran volumen de agua que estuvo en la superficie durante los años de pruebas atmosféricas quedó marcado con tritio.

En 1972, el Grupo de Operaciones del Estudio Geoquímico de Secciones Oceánicas (GEOSECS) midió los niveles de tritio a varias profundidades, a lo largo de una tira meridiana de Atlántico. Los datos mostraron que el tritio de las pruebas atmosféricas lo había transportado la catarata del Estrecho de Dinamarca hasta una profundidad aproximada de 3500 metros, penetrando en la base del agua profunda del Atlántico Norte. Sin embargo, el proyecto GEOSECS no halló tritio en la capa más profunda de agua antártica de fondo. Esto indica que el tritio depositado en el hemisferio Sur no ha tenido tiempo de llegar al hemisferio Norte por el camino de las corrientes profundas. A la velocidad de intercambio oceánico antes estimada, habrá de transcurrir varios cientos de años antes que el tritio aparezca en el agua antártica de fondo del Atlántico Norte.

El tritio es generalmente difícil de detectar en el hemisferio Sur, puesto que la mayoría de las pruebas de bombas se registraron en el hemisferio Norte. En cambio, los halocarburos —freones y otros gases que, según se cree, erosionan la capa de ozono— producen una mayor marca en el hemisferio Sur. Las concentraciones de esos gases antropogénicos en la atmósfera han ido creciendo rápidamente en los últimos decenios. Se disuelven en el agua superficial del océano y se van difundiendo lentamente hacia abajo. John L. Bullister, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, ha descubierto recientemente una forma de freón, llamado freón 11, en una fuente primaria del agua antártica de fondo: la catarata de la plataforma de hielo de Filchner. Esta se encuentra en el mar de Weddell, al sur del Océano Atlántico y frente a la costa de la Antártida. El agua fría y densa se vierte desde la plataforma de hielo de Filchner al profundo mar de Weddell. El hecho de que Bullister midiese altas concentraciones de freón 11, a una profundidad de 1500 metros en el Antártico, constituye una prueba palmaria de que los compuestos de fabricación humana están empezando a penetrar en el agua antártica de fondo.

La manifestación más espectacular de las cataratas oceánicas gigantes estriba en su enorme caudal. De nuevo, la catarata del estrecho de Dinamarca se convierte en paradigma. En 1967, L. Val Worthington, de Woods Hole, trató de medir su caudal disponiendo un conjunto de 30 correntímetros a varias profundidades, en la región de la cresta. Las corrientes eran tan intensas que se perdieron 20 de los correntímetros. Los que se recuperaron habían registrado corrientes de hasta 1,4 metros por segundo, cifra considerable si se compara con las velocidades habituales de flujo —de 0,1 a 0,5 metros por segundo— en las corrientes superficiales. Sobre la base de ese altísimo flujo, el caudal de la catarata se estimó en cinco millones de metros cúbicos por segundo, que es la cifra que dimos arriba.



3. PRINCIPALES CATARATAS OCEANICAS, representadas en este mapa del Atlántico. El estrecho de Dinamarca, entre Groenlandia e Islandia, produce la que es quizá la mayor catarata del mundo, con un caudal de unos cinco millones de metros cúbicos por segundo. La catarata de Islandia Faroes aporta agua fría y densa al Altántico Norte. La catarata de la meseta abisal de Ceara, que corre de Sur a Norte, provee al Atlántico Norte de su agua más fría y profunda: el agua antártica de fondo. A través del Desfiladero del Descubrimiento, el agua fluye a razón de 210.000 metros cúbicos por segundo, de la parte oriental del Atlántico Ecuatorial al este del Atlántico Norte. La catarata de la plataforma de hielo de Filchner produce parte del agua de fondo más densa del mundo. La catarata de las islas Shetland del Sur desempeña un papel destacado en el mantenimiento de las regiones de alimentación del krill. Esas cataratas se deben a diferencias de temperatura; la de Gibraltar recibe, por contra, su impulso de diferencias de salinidad. La línea roja señala la parte de la expedición GEOSEC de 1972-73 que dio por resultado el corte vertical de la figura 4.

Por desgracia, tras los estudios iniciales de Worthington apenas si se realizaron mediciones de caudal. En 1973, investigadores del Instituto Bedford de Oceanografía en Darmouth, Nueva Escocia, llegaron a una estima de 2,5 millones de metros cúbicos por segundo. La amenaza, para los correntímetros anclados, que representa la flota de arrastre de altura en el estrecho de Dinamarca puede impedir cualquier investigación futura.

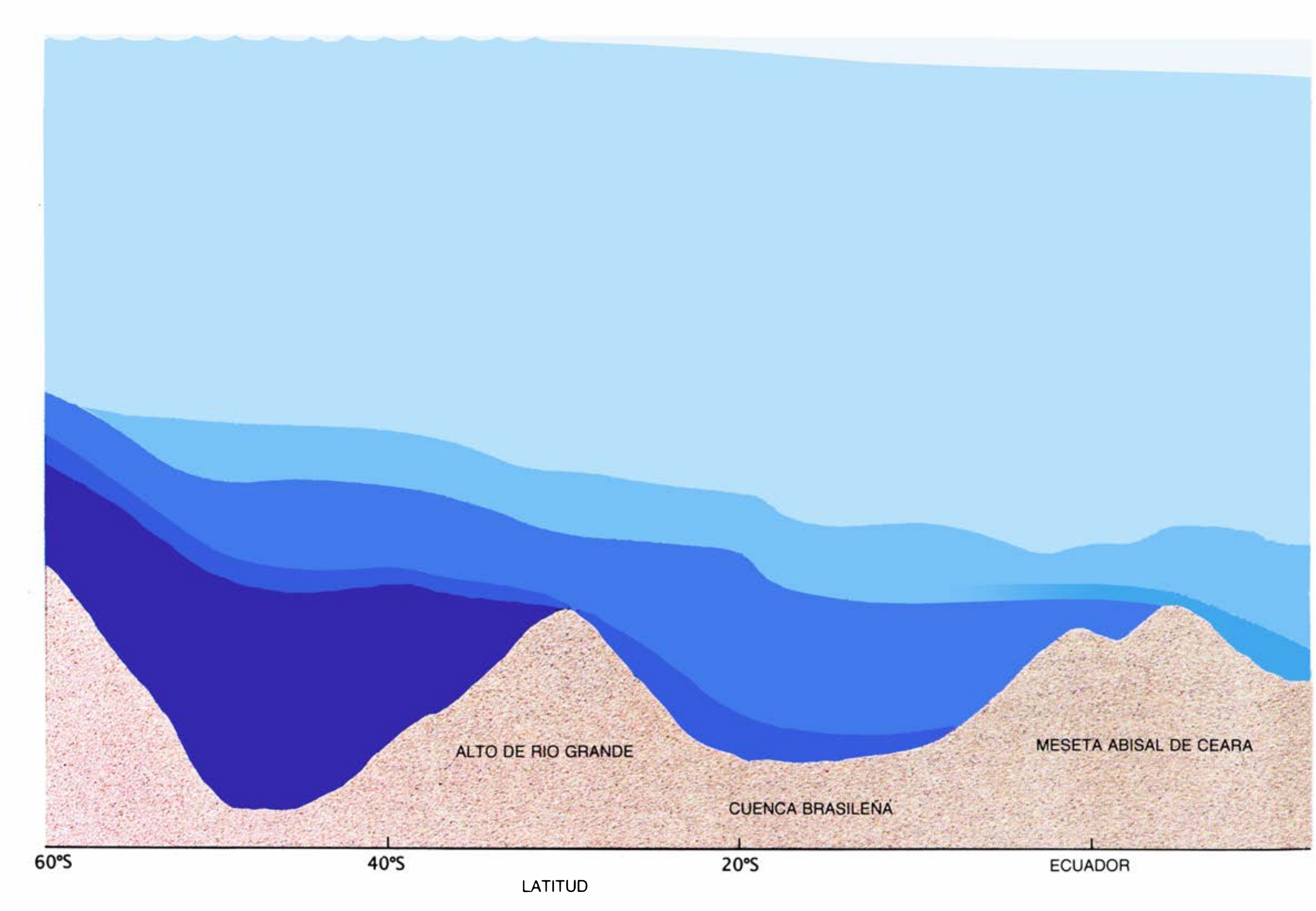
En 1978, Worthington y el autor acometieron mediciones de caudal en la catarata de Ceara, que proporciona agua antártica de fondo a la cuenca del Atlántico Norte. Los correntímetros, dispuestos sobre la cresta, a cuatro grados de latitud Norte, suministraron una estima del caudal de uno a dos millones de metros cúbicos por segundo, lo que representa de cinco a diez veces el caudal del río Amazonas. Merced al progreso de la técnica de las boyas, pudimos mantener en posición los instrumentos un año entero, sin pérdida alguna. Esto nos permitió medir el caudal a intervalos de una décima de grado Celsius, entre 1,0 y 1,9 grados C.

Hacia la misma época, Nelson G. Hogg y William J. Schmitz, Jr., de Woods Hole, junto con Wilford D. Gardner y Pierre E. Biscay, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, midieron el caudal de la catarata de Río Grande. Después de dos años de observaciones, estimaron que el caudal que llega a esta catarata es de cuatro millones de metros cúbicos por segundo, quizás el asignado a la catarata del estrecho de Dinamarca.

Esos enormes flujos suelen ir impulsados por diferencias de temperatura entre las dos cuencas; pero no siempre acontece así. Debido a la evaporación, el agua del Mediterráneo es mucho más salina, y por tanto más densa, que el agua más profunda del Atlántico, a pesar de hallarse más caliente que ésta. El agua que sale del Mediterráneo a través de Gibraltar tiende a hundirse en el Atlántico, provocando una catarata.

Durante su descenso, el agua salina mediterránea se mezcla con el agua atlántica. Esta mezcla reduce la densidad del agua mediterránea hasta que, a una profundidad de 1000 metros, se iguala a la del agua atlántica circundante. A esta profundidad, el agua detiene su descenso y se expande en forma de penacho sobre una considerable porción del Atlántico nororiental, donde es responsable de un pronunciado máximo en la salinidad oceánica.

La mezcla turbulenta de la catarata de Gibraltar con las aguas atlánticas explica la profundidad del penacho, pero es, de suyo, un rompecabezas. Nadie sabe todavía por qué la catarata de Gibraltar se mezcla con su entorno de manera más intensa que la catarata del estrecho de Dinamarca. Cuatro explicaciones posibles se han aducido: (1) la abrupta pendiente de la plataforma continental junto a España, (2) accidentes geográficos más ásperos que en el estrecho de Dinamarca, (3) el hecho



4. ESTE CORTE VERTICAL DEL ATLANTICO, de Groenlandia a la Antártida, permite poner de manifiesto varias cataratas. El Alto de Río Grande, a unos 30 grados de latitud Sur, impide el paso hacia el norte del agua antártica de fondo, con temperaturas por debajo de cero grados. A pesar de ello se derrama agua a 0,2 grados sobre la dorsal de la Cuenca Brasileña, formando la catarata de Río Grande. La meseta abisal de Ceara, cerca del ecuador, impide

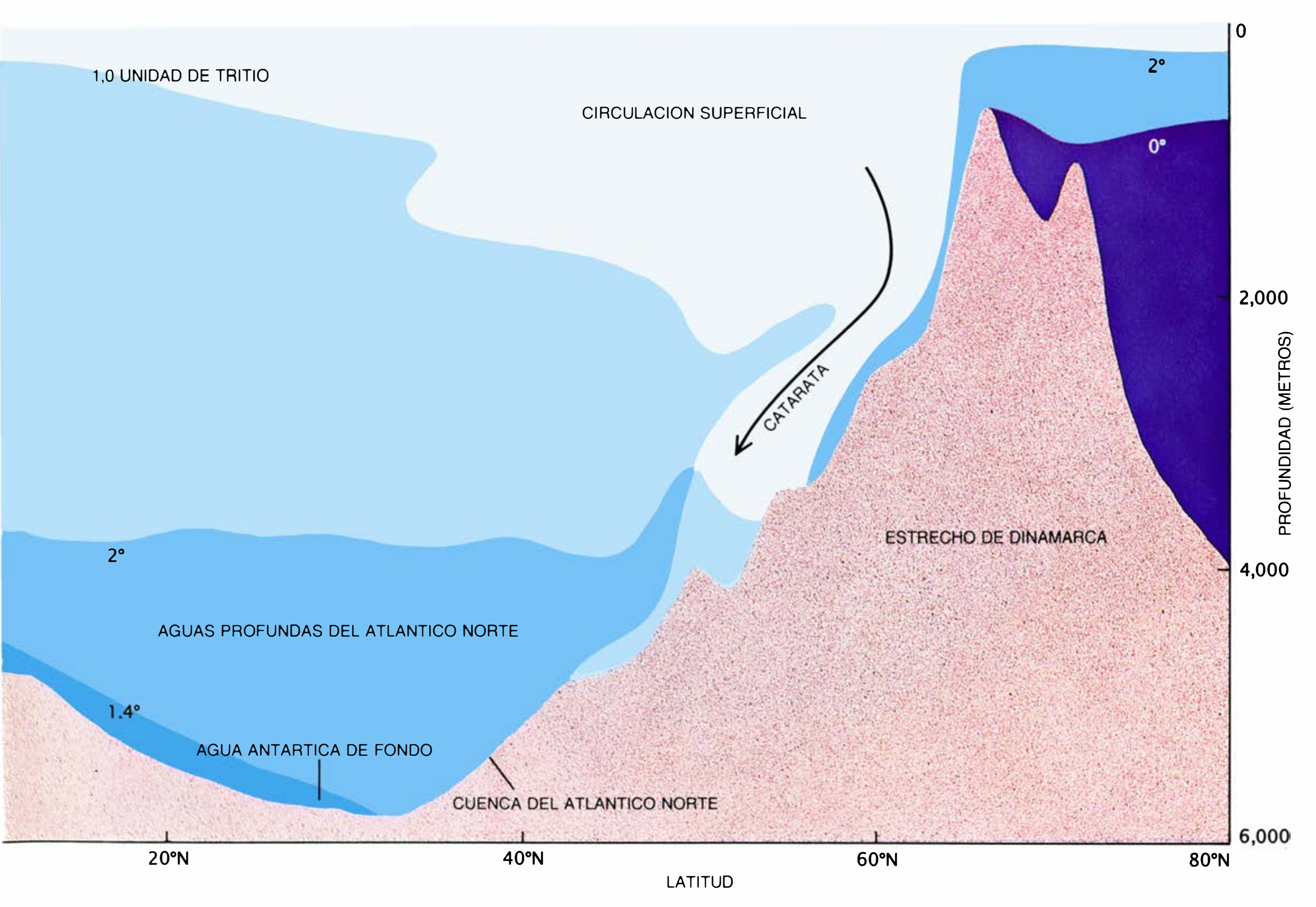
de que la catarata mediterránea esté impulsada por una diferencia de salinidad, mientras que la del estrecho de Dinamarca es una catarata térmica, y (4) el fuerte oleaje en la corriente a través del estrecho de Gibraltar, como resultado de mareas y borrascas. Para determinar cuál de esas explicaciones es la correcta, si lo es alguna, se requerirán estudios fundamentales en dinámica de fluidos geofísicos, además de muchas otras observaciones.

A pesar de la imprecisión que rodea a los factores que determinan el grado de mezcla, los investigadores están de acuerdo en la importancia máxima de la mezcla para establecer el balance calorífico de las cataratas y sus alrededores. La catarata Ceara penetra en el Atlántico Norte como una lengua de agua fría. Como se ha observado que esta lengua permanece estacionaria a lo largo de muchos años, el agua que fluye hacia el norte debe estar calentándose y, por tanto, ascendiendo entre las isotermas. Esto sólo es posible si el agua más caliente de arriba se mezcla con la de la catarata y la calienta. Los expertos en hidrodinámica llaman intercambio turbulento a este proceso.

Los límites escarpados de las cataratas convierten a éstas en un buen lugar para estudiar el intercambio turbulento en el océano. El grado de mezcla y, por tanto, los balances de energía calorífica (el grado en que la catarata puede ceder o tomar calor) son relativamente fáciles de obtener. Los estudios de balance calorífico en las cataratas realizados por Hogg, Schmitz, Gardner y Biscay, por Worthington y el autor, y por Peter Saunders, del Instituto de Ciencias Oceanográficas de Inglaterra, indican que la eficacia de la mezcla turbulenta, para intercambiar calor, multiplica por mil la alcanzada por la conducción molecular ordinaria. Con el tiempo, esperamos determinar balances de energía calorífica para otras cataratas y, finalmente, para el océano entero.

Hasta cierto punto, la catarata puede considerarse un sistema aislado del resto del océano; de ahí que se preste al estudio de laboratorio. En 1959, Thomas H. Ellison y J. Stewart Turner, entonces en la Universidad de Manchester, realizaron un sencillo experimento: dejaron salir agua salada en la parte superior de una pendiente que estaba en el fondo de un tanque lleno de agua dulce. El agua salada, más densa, se deslizó hasta el fondo del tanque, donde se midió el cambio de salinidad en función de la pendiente y del caudal.

Estas dos variables determinan el número de Froude, que, en esencia, calcula el cociente entre fuerzas inerciales y fuerzas de empuje hidrostático (cociente entre la velocidad real de un objeto y la velocidad que adquiriría si estuviera sometido sólo a la aceleración de la gravedad). Ellison y Turner hallaron que, cuando el número de Froude en tal catarata de laboratorio era mucho mayor que la unidad, la corriente se tornaba turbulenta; la mezcla resultante, a su vez, arrastraba el número



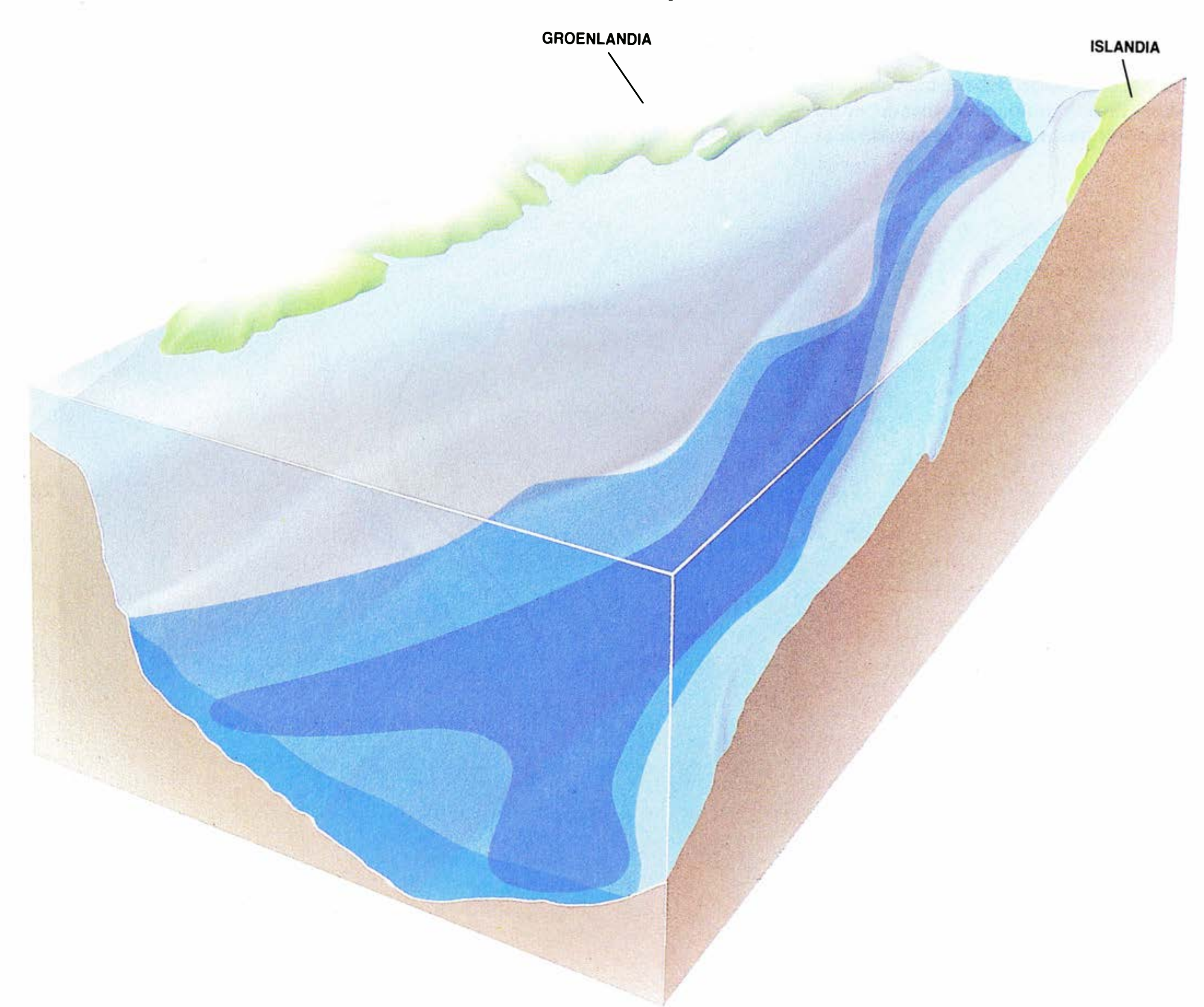
que el agua a temperatura inferior a un grado fluya más hacia el norte. El agua a 1,4 grados se derrama sobre la cresta de la cuenca del Atlántico Norte, formando la catarata de Ceara, que proporciona a esa parte oceánica agua antártica de fondo. La catarata del Estrecho de Dinamarca arrastra agua a dos grados desde el mar de Noruega hasta una profundidad de 3500 metros; forma las aguas profundas del Atlántico Norte, por encima del agua antártica de fondo.

de Froude hacia la unidad. Esto sugería, pues, que la corriente de la catarata tendía a equilibrar las fuerzas de inercia y de empuje hidrostático.

El experimento de Ellison y Turner resultaba un burdo modelo de una catarata oceánica e ignoraba cierto número de factores, que complican las cosas y que deben incluirse en una representación verosímil. Los principales son las fuerzas de Coriolis y de rozamiento. La fuerza de Coriolis se debe a la rotación terrestre y tiende a desviar un objeto en movimiento perpendicularmente a su trayectoria. Si un objeto avanza hacia el Sur, dicha fuerza lo desviará hacia su derecha en el hemisferio Norte, y hacia su izquierda en el hemisferio Sur. En la catarata del estrecho de Dinamarca, las fuerzas de Coriolis hacen que el agua ascienda aproximadamente un kilómetro más en la pared derecha del canal que en la pared izquierda. En virtud también de las fuerzas de Coriolis, la corriente mediterránea salada se curva hacia la derecha después de salir del estrecho de Gibraltar; la catarata que forma corre, en realidad, paralela a la costa española.

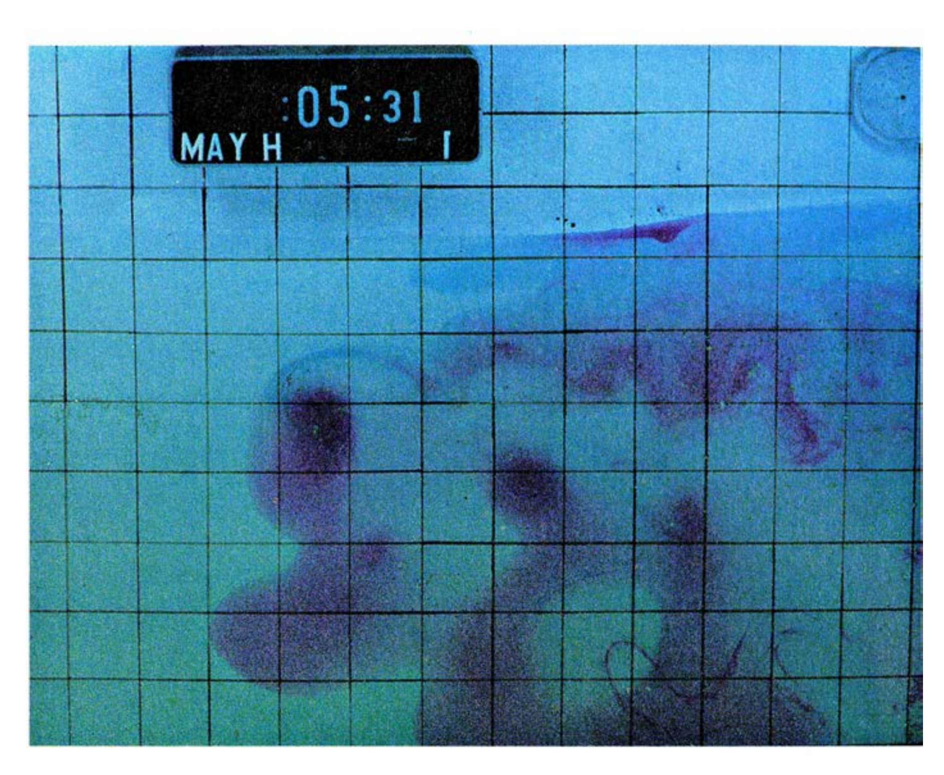
Peter C. Smith, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, pretendió, en 1973, identificar los factores que complicaban el análisis de la dinámica de las cataratas oceánicas. Construyó un modelo de laboratorio que producía, por medio de una mesa giratoria, la fuerza de Coriolis e incluía también el rozamiento entre el agua y el fondo del canal. Después, en un guión teórico, añadió el rozamiento entre el agua de la catarata y las capas de agua encima de ella, que se tuvo en cuenta en forma de incorporación o entremezcla de diferentes capas fluidas. Del estudio teórico, sacó la conclusión siguiente: las tasas de mezcla halladas en el estrecho de Dinamarca resultaban del rozamiento con el fondo, más que de la mezcla con capas de agua vecinas. También llegó a la conclusión de que el rozamiento con el fondo dominaba en la vecindad de la cima de la catarata, mientras que corriente abajo la mezcla adquiría una importancia creciente.

En los últimos años, James F. Price y Martha T. O'Neil, de Woods Hole, han refinado el modelo de Smith; su fórmula para la entremezcla se basa en estudios de alta resolución de la mezcla



5. CATARATA DEL ESTRECHO DE DINAMARCA, representada en perspectiva. La cresta de esta catarata es el Alto de Groenlandia-Islandia, que yace a 650 metros de profundidad. El agua del mar de Noruega fluye sobre la cresta a razón, según se ha estimado, de 25 veces el caudal del Amazonas. La fuerza de Coriolis hace que el agua ascienda en la pared derecha (mirando corriente abajo) aproximadamente un kilómetro más arriba que en la pared izquierda. La parte en azul oscuro es agua a un grado Celsius, que se extiende en forma de abanico alrededor de la punta meridional de Groenlandia. Por encima de ella, hay agua a 1,8 grados; penetra en el Atlántico Norte en forma de lengua y se extiende hacia el sur, hasta Terranova. (Dibujo realizado por G. Retseck.)

en las capas oceánicas superiores. En colaboración con Thomas B. Sanford, de la Universidad de Washington, y Rolf G. Lueck, de Johns Hopkins, midieron la velocidad, temperatura y salinidad en la catarata del estrecho de Gibraltar. La comparación de las observaciones con el modelo indica que éste da una descripción realista de la variación de densidad a lo largo de una catarata oceánica. Sus conclusiones sugieren también (confirmando los resultados de Smith) que la resistencia es producida principalmente por rozamiento con el fondo, a menos que se supere cierta velocidad crítica, punto a partir del cual el agua se mezcla activamente con la de su alrededor. Sin embargo, en contraste con los resultados de Smith, estos investigadores hallaron que la entremezcla es importante cerca de la cima de la catarata, mientras que el rozamiento con el fondo cobra interés corriente abajo.



6. TORBELLINOS DE LABORATORIO, creados introduciendo una burbuja de agua salada y densa, teñida aquí de rojo, en un recipiente giratorio de agua dulce, parte de la cual está teñida de azul. El agua densa desciende para sufrir una mezcla turbulenta con el agua circundante, al tiempo que absorbe hacia abajo el agua menos densa de arriba. La fuerza de Coriolis hace que el movimiento de descenso adquiera giro ciclónico y desencadene remolinos. Aquí pueden verse tres torbellinos; cada uno consta de una lente de fluido rojo sobre la cual descansa el agua azul superficial. El mismo proceso, instado por el descenso del agua densa en las cataratas, podría generar también remolinos oceánicos de varios kilómetros de diámetro.

Queda una cuestión: saber si los resultados de los modelos teóricos y de los experimentos de laboratorio —que están limitados por el tamaño de las mesas giratorias— representan fielmente el océano real, donde la turbulencia es probablemente mucho mayor y donde la topografía del fondo introduce una cantidad, en gran parte desconocida, de rozamiento y entremezcla. La verdad es que apenas se ha podido comenzar a medir ambas magnitudes en el fondo oceánico. No está, pues, todavía claro si el valor del rozamiento admitido por los investigadores es apropiado para el océano real; los nuevos datos ayudarán a decidir si las hipótesis introducidas en los modelos son o no razonables.

Pese a la escasez de datos fiables, los investigadores continúan aumentando la complicación de los modelos. Recientes experimentos de laboratorio han resuelto con detalle los efectos provocados por la fuerza de Coriolis. Los ensayos realizados en mesas giratorias por Ross W. Griffiths, de la Universidad Nacional Australiana, e independientemente por Melvin E. Stern, de la Universidad estatal de Florida, Glenn R. Fierl y Barry A. Klinger, del MIT, y el autor muestran que la fuerza de Coriolis genera pequeños remolinos solitarios, encima mismo de la catarata, cerca del fondo oceánico.

Se han propuesto dos mecanismos discrepantes para la generación de los remolinos. Griffiths sugiere que la catarata produce una onda "inercial" en el océano, es decir, una ola de vorticidad que gira primero en una dirección y después en la otra, como el agua en una lavadora doméstica. Las olas se propagan hacia arriba y, según Griffiths, rompen y producen intensos ciclones encima de la catarata. Tal proceso se ha observado realmente en experimentos en los que una reja agitadora produce ondas inerciales en un fluido en rotación.

Stern, Flierl, Klinger y el autor proponen un mecanismo diferente. Creemos que la circulación ciclónica es un efecto directo de la mezcla vertical, debida a la turbulencia en pequeña escala de un fluido en rotación, cuando agua densa reposa bajo agua menos densa. Según este modelo, la turbulencia mezcla el agua menos densa de arriba con la más densa de abajo. La densidad de la primera aumenta así, se hunde y aspira la situada directamente encima, arrastrándola hacia abajo. La fuerza de Coriolis reorienta la corriente en el plano horizontal, haciéndola girar en vórtice entre la catarata y la superficie del agua. Tales vórtices podrían ser la contrapartida de los grandes vórtices oceánicos, de varios centenares de kilómetros de diámetro, capaces de persistir durante varios años [véase "Anillos de la Corriente del Golfo", por Peter H. Wiebe; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1982]; hasta ahora, sin embargo, los vórtices menores no se han observado fuera del laboratorio.

Además de sus efectos sobre el clima y la salinidad de las profundidades oceánicas, las cataratas podrían ejercer una influencia poderosa sobre la biología marina. Se aprecia ello en la catarata de las islas Shetland del Sur. Tras salir del mar de Weddell, que está al sur del Océano Atlántico, la catarata de las islas Shetland del Sur desciende con el tiempo hacia el oeste, hasta el mar de Escocia, al sur del Océano Pacífico. Worth D. Nowlin, Jr., de la Universidad de Artes y Minería de Texas, y Walter Zenk, del Instituto de Ciencias Marinas de la Universidad de Kiel, en Alemania Occidental, han sugerido que el ciclo de vida de los minúsculos camarones ("krill") del mar de Escocia está conformado por la profunda catarata.

Los biólogos saben que el krill adulto se reúne para procrear cerca de las Shetland del Sur, formando extensos "prados" donde acuden las ballenas para alimentarse. Estas zonas caen cerca de la inmensa corriente circumpolar antártica, que circula superficialmente

hacia el este. Las huevas del krill se ponen hacia 50 metros de profundidad, pero se hunden hasta unos 1000 metros antes de que las larvas salgan; no se podía explicar, pues, cómo las larvas, que no saben nadar, pueden regresar a las zonas de procreación cuando son adultas.

Curiosamente, se ha observado que las zonas de "jardín de infancia", donde se encuentran las larvas, están situadas a cientos de kilómetros hacia el oeste, aun cuando la corriente circumpolar antártica avance hacia el este. Nowlin y Zenk sugieren que las cataratas en las profundidades transportan el krill hacia el oeste. Si esta suposición es correcta, las larvas ascienden entonces, tras salir del huevo, y son transportadas hacia el este nuevamente, hacia la zona de procreación, por la corriente antártica. Las cataratas oceánicas podrían proporcionar el mecanismo para cerrar el circuito entre la zona de procreación, el jardín de infancia y las zonas de alimentación.

Aunque mucho hemos avanzado, en los últimos veinte años, sobre la extensión de las cataratas y su caudal, temperatura y composición química, queda campo por investigar y poder establecer las tasas de mezcla con el agua circundante y el efecto de frenado en el fondo del océano. De ese estudio saldrá un mejor conocimiento de las grandes cascadas de agua del planeta, cuya influencia sobre la salinidad, temperatura y biología del océano repercute en el clima y la ecología global de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN ATTEMPT TO MEASURE THE VOLUME TRANSPORT OF NORWEGIAN SEA OVERFLOW WATER THROUGH THE DENMARK STRAIT. L. V. Worthington en *Deep-Sea Research*, vol. 16, Suplemento, págs. 421-432; 1 de agosto de 1969.

A STREAMTUBE MODEL FOR BOTTOM BOUNDARY CURRENTS IN THE OCEAN. Peter C. Smith en *Deep-Sea Research*, vol. 22, n.º 12, págs. 853-873; diciembre de 1975.

THE FLUX AND MIXING RATES OF ANTARTIC BOTTOM WATER WITHIN THE NORTH ATLANTIC. J. A. Whitehead, Jr., y L. V. Worthington en *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, n.º C10, págs. 7903-7924; 20 de septiembre de 1982.

GEOSECS ATLANTIC, PACIFIC, AND INDIAN OCEAN EXPEDITIONS, VOL. 7: SHOREBASED DATA AND GRAPHICS. GEOSECS Comité Ejecutivo, H. Gote Ostlund, Harmon Craig, Wallace S. Broeker y Derek W. Spencer. National Science Foundation, U. S. Government Printing Office, 1987

Ciencia y sociedad

Astronomía, hoy

Entre los distintos focos de interés de los astrofísicos, cuatro merecen especial atención: la supernova 1987A, el centro de la galaxia, las lentes de materia oscura y el vacío del Boyero. Veamos el estado de la cuestión en cada uno de ellos.

Supernova 1987A. Dos años después de su aparición en la Gran Nube de Magallanes, la supernova 1987A sigue inquietando, pues difiere, en bastantes aspectos, del modelo clásico que figura en los textos.

Según Rashid A. Sunyaev, del Instituto Soviético de Investigaciones Cósmicas, y otros, la expansión de la "envoltura" de la estrella progenitora en virtud de la explosión parece tener una forma asimétrica y complicada y poseer una composición heterogénea. De las continuas observaciones de elementos pesados, hierro y cobalto, forjados en el núcleo de la estrella progenitora, se infiere que éstos se mezclaron, en la explosión, con elementos ligeros (hidrógeno y helio) de las capas exteriores de dicha estrella progenitora. El doble corrimiento Doppler observado en ciertas mediciones, simultáneamente rojo y azul, evidencia la fragmentación de la estrella: la materia del lado más alejado de la envoltura respecto de la Tierra queda ahora a la vista, lo mismo que lo han estado las restantes partes procedentes de otras zonas de la estrella en cuestión.

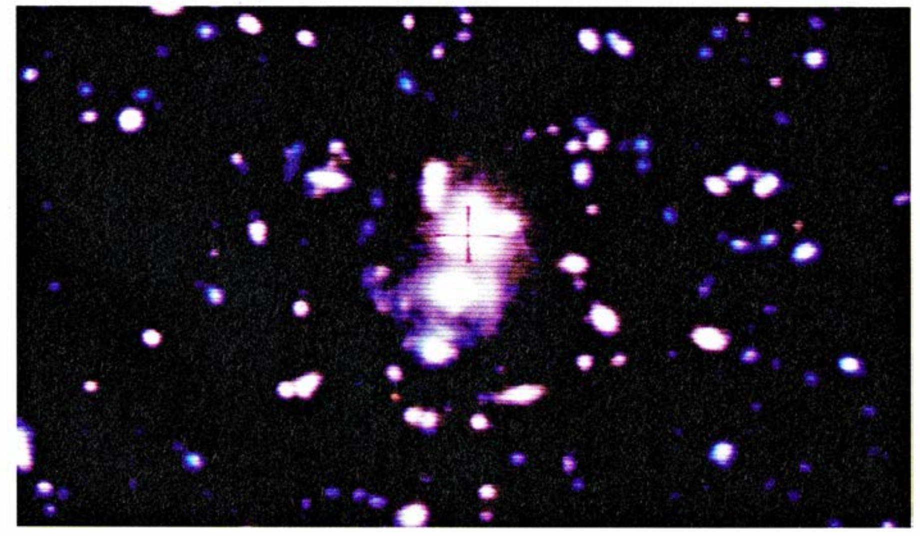
Mediante técnicas interferométricas, los astrofísicos del Centro Smithsoniano obtuvieron imágenes donde se aprecia una región de la estrella deformada que coincide con la misma zona donde el mismo grupo había observado una misteriosa compañera de la supernova al poco de su aparición. Ello ha dado pie a suponer que la progenitora de la supernova 1987A, la gigante azul Sanduleak -69 202, podría tener una compañera.

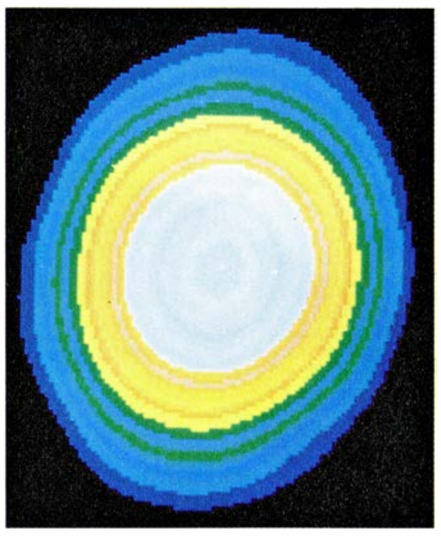
El núcleo compacto que dejan detrás suyo la mayor parte de las supernovas permanece velado. En opinión de Robert P. Kirshner, de Harvard, las recientes observaciones de una cola en el largo y suave declinar de la luz procedente de la supernova podrían constituir el primer indicio de su núcleo: una estrella de neutrones ordinaria, un púlsar (una estrella de neutrones con una elevada velocidad de rotación) o un agujero negro.

El centro galáctico. ¿Existe un agujero negro en el centro de la Vía Láctea, como sugerían las observaciones realizadas a través de un detector de radiación gamma, instalado a bordo de un globo sonda a finales de 1977? El instrumento, diseñado en los laboratorios nacionales Sandia y en los de la compañía AT&T Bell, detectó un potente foco de rayos gamma procedente del centro de la galaxia. El nivel de energía de la radiación, 511.000 electronvolt (511 keV), indicaba que ésta sólo podía generarse por aniquilamiento de electrones con sus antipartículas, los positrones. Según los físicos teóricos, el único sitio donde pueden darse las fuerzas que producen de una forma tan copiosa antimateria es en un agujero negro.

Pero dos años más tarde, esa radiación cesó bruscamente y, durante un decenio, no se detectó. Hasta que, hace este mes un año, un instrumento diseñado en el Instituto de Tecnología de California descubrió abundantes rayos X y rayos gamma de baja energía procedentes de cierta posición, distante del centro de la galaxia unos 0,7 grados, es decir, 340 años luz aproximadamente. Al mes siguiente, un grupo de los laboratorios de Sandia y de AT&T, junto con un equipo de la NASA, detectó de nuevo la radiación de 511 keV. Observaciones que se confirmaron en noviembre.

El instrumento de este último grupo, sin embargo, no tiene la misma resolución que el utilizado por los expertos del Caltech; no se puede, pues, precisar con exactitud si la radiación reciente de 511 keV procede del centro de la galaxia o de una zona "cercana" y coincidente con la detectada por el grupo del Caltech. Se espera que a lo largo de este año se realicen las observaciones que permitan despejar esa incógnita. En cualquier caso, se piensa que la radiación podría proceder de un agujero negro cuya masa fuera 1000 veces la masa solar, por lo menos, que absorbería intermitentemente masa de una nube de gas cercana. Este gas correspondería al río de gas de 15 años luz de longitud, detectado por Paul T. P. Ho, de la Universidad de Harvard, que fluye hacia el centro de la galaxia.





LOS CUMULOS DE GALAXIAS distorsionan la imagen de galaxias más distantes cuya radiación sigue caminos parecidos, según se puede apreciar en el dispositivo diseñado por J. Anthony Tyson (izquierda)*. La supernova 1987A adquiere esa configuración oviforme en una imagen interferométrica obtenida por astrofísicos de Harvard* (derecha)*.*

Lentes de materia oscura. Desde hace tiempo, los astrónomos sospechan que la materia que se observa directamente es sólo una fracción de la materia total del universo. Sin embargo, el problema con que se enfrentan los científicos estriba en cómo detectar la otra materia, la oscura. Hay quien opta por examinar los signos de distorsión de la imagen de las galaxias distantes, causada por el campo gravitatorio de la masa oscura próxima.

J. Anthony Tyson, de los laboratorios AT&T, es el defensor de esta técnica. Con instrumentos de carga acoplada ha detectado enjambres galácticos a 10.000 millones de años luz de distancia, en el confín del universo visible. También ha colaborado en el desarrollo de programas que reconocen automáticamente signos de la distorsión en las imágenes de estas galaxias producida por objetos cósmicos. Las lentes gravitatorias más potentes hacen que la radiación procedente de las galaxias más distantes se curve a su alrededor. Tyson ha descubierto varias regiones donde se distorsiona la imagen de galaxias distantes. El grado de la distorsión sugiere que podría deberse principalmente a materia oscura.

El vacío del Boyero. La mayoría de los modelos cosmológicos predicen que la materia está distribuida regularmente en el espacio. Sin embargo, los mapas tridimensionales de galaxias, trazados utilizando el corrimiento hacia el rojo para estimar distancias, nos revelan que la materia se concentra en "agregados", "capas" o "burbujas", separados unas de otras por inmensas zonas vacías. A finales de los años setenta, los astrónomos descubrieron la mayor zona vacía del universo conocida: una región esférica de 400 millones de años luz de diámetro, más allá de la constelación del Boyero.

Pero las observaciones recientes desmienten que el vacío del Boyero sea tal. En efecto, Gregory D. Bothun y Gregory S. Aldering, de la Universidad de Michigan, al examinar las mediciones realizadas por el satélite de infrarrojos IRAS se han encontrado con cientos de galaxias, ópticamente oscuras; se trata de estructuras con mayor cantidad de polvo cósmico y menos evolucionadas que las galaxias brillantes ordinarias. La luminosidad aparente de estas galaxias y las correspondientes medidas del corrimiento hacia el rojo obtenidas mediante telescopios ópticos indican que muchas de ellas se hallan en la zona del vacío del Boyero.

¿Puede haber galaxias oscuras con polvo cósmico en las otras zonas del universo consideradas vacías y que se han clasificado al observar otras galaxias brillantes? La respuesta parece ser que no necesariamente. Otros investigadores, al estudiar los datos más recientes aportados por el satélite IRAS, afirman que en un área del vacío del Boyero las galaxias oscuras tienden a agruparse en la misma región en que lo hacen las galaxias brillantes. Parece ser, pues, que hace falta más información acerca de las galaxias de uno u otro tipo, para determinar de qué modo está repartida la materia en el universo.

El verano del 88

Durante el verano del año 1988, muchos países sufrieron una agobiante sequía. Los campos adquirieron tonos pardos, se secaron los estanques y las lagunas y la producción de grano cayó, en algunos lugares, de un 30 a un 40 por ciento. ¿Estamos asistiendo a los primeros signos visibles del calentamiento global de la atmósfera del planeta, debido al incremento de los gases que contribuyen al efecto invernadero? ¿Se trata, por contra, de un episodio de fluctuación intensa, aunque "normal" del clima terrestre?

Cierto es que la atmósfera del planeta se está calentando gradualmente. Lo que no obsta para que muchos expertos opinen que las recientes perturbaciones climáticas son demasiado bruscas para corresponder a un fenómeno lento como es el incremento del efecto invernadero, provocado por un mayor contenido atmosférico de dióxido de carbono y otros gases. Así, los cambios climáticos del año 1988 y 1989 corresponderían a una más de las periódicas fluctuaciones que azotan el planeta.

En un número reciente de la revista *Science*, Kevin E. Trenberth, Grant W. Branstator y Phillip A. Arkin han esbozado una explicación para el origen de la sequía que asoló su país, Estados Unidos, el último verano. Relacionan la sequía con sucesos cíclicos que acontecen en el Pacífico tropical y periódicamente dan lugar a "El Niño": la aparición en el Pacífico oriental, frente a la costa de Ecuador y Perú, de agua superficial a una temperatura anormalmente elevada.

Alternándose con El Niño y de duración parecida, hay un episodio frío, "La Niña"; con ella, la temperatura del agua superficial en el Pacífico oriental baja drásticamente. Este episodio frío está causado por vientos alisios de una fuerza poderosísima que impulsan las calientes aguas superficiales hacia el oeste, reemplazadas así por aguas frías y alterándose los patrones de circulación atmosférica en la zona. Con el tiempo, los alisios pierden fuerza y el agua caliente del Pacífico occidental regresa hacia el continente americano. Cuando esto ocurre, nace "El Niño" y se establece un ciclo, que se va repitiendo a intervalos de cuatro años.

Apoyados en refinados modelos climáticos, esos tres investigadores mantienen que la masa de agua fría que empezó a formarse en la primavera del año 1988 (después de que remitiera el episodio de "El Niño" de 1986-1987) se combinó con el agua más caliente del sudoeste de Hawai y desplazó hacia el norte la zona intertropical de convergencia (denominada así porque es allí donde se encuentran los vientos alisios del hemisferio Norte y del hemisferio Sur). La actividad tormentosa de la zona salió al paso de la corriente de chorro norteamericana y de la corriente de aire que fluye hacia el este responsable de las lluvias de primavera y verano. En consecuencia, la corriente de chorro se desvió hacia Canadá, dejando detrás un sistema de altas presiones, enorme y estacionario, que fue la causa del tiempo despejado y caluroso. La sequía se autoperpetuaba: las plantas liberaban mucho menos vapor de agua al aire que en condiciones normales, las temperaturas subían y el agua residual del suelo se evaporaba.

La teoría es sugestiva, pero no se halla libre de puntos débiles. Mark A. Cane coincide en señalar que existe una probable conexión entre la sequía y el episodio frío, pero disiente al afirmar que uno puede darse sin el otro; para comprobarlo, aduce, basta con mirar los registros históricos.

Trenberth responde a ello que, si bien no todos los episodios de "La Niña" están asociados a sequías posteriores, el ocurrido el año pasado fue especialmente frío, la diferencia de temperaturas del agua con respecto a la del entorno alcanzó los dos o tres grados Celsius y fue insólitamente extenso. Se sabe, además, que los episodios de "El Niño" están interconectados con sucesos oceánicos y atmosféricos y, por tanto, parece razonable suponer que "La Niña" posee interconexiones parecidas.

Si las conclusiones de Trenberth y sus colegas son ciertas, ¿qué ocurrirá el año 1989? Ni que decir tiene que es inimaginable una predicción exacta; se espera que la situación retorne a condiciones meteorológicas más normales. A comienzos de este mismo mes de abril, cuando los vientos alisios llegan con menos fuerza y se establece la tendencia hacia aguas cálidas o frías en la

superficie, empezaremos a saber algo con alguna certeza.

Otros se muestran cautos y opinan que pertenece al reino de lo temerario dar el problema por zanjado. Aunque se restablezca la normalidad climática es esencial entender las consecuencias del incremento de los gases que producen el efecto invernadero y actuar en concordancia.

¿Matemática u ordenador?

Erase una vez un tiempo en que las demostraciones matemáticas tenían que ser cortas, simples e inteligibles para la mente humana. Ese objetivo se está perdiendo por momentos. En 1976, Wolfgang Haken y Kenneth Appel hicieron público que habían asignado a su ordenador la tarea de buscar los 1482 grafos que representan todas las configuraciones de un mapa. El programa encontró que bastaban cuatro colores para colorear el mapa de modo que dos regiones adyacentes no compartan el mismo color. Aunque en el cómputo de estos grafos se invirtieron más de 1000 horas de ordenador, en teoría los resultados eran susceptibles de ser comprobados a mano.

En noviembre del año pasado, se publicó la solución de parte de un problema distinto, que dio al traste, y para siempre, con la posibilidad de comprobación de pizarra. Tras 3000 horas de cálculo en un superordenador CRAY-1 (repartidas en un período de dos años en los momentos en que la máquina estaba desocupada), el científico canadiense Clement W. H. Lam anunció que su grupo de matemáticos y de expertos en computación habían sometido a prueba un ejemplo de conjetura, propuesto dos siglos antes por Carl Friedrich Gauss.

No hay forma de comprobar el resultado de su trabajo, según el cual no existen planos proyectivos finitos de orden 10. (Si existiera tal plano proyectivo, podría asociársele una matriz de 111 filas y columnas, donde cada fila tendría exactamente 11 posiciones ocupadas y cada dos líneas tendrían sólo una única posición ocupada en común.) Para comprobar el resultado negativo, el CRAY examinó aproximadamente 100 billones de diferentes posibilidades durante los dos años en que se ejecutó el programa. El resultado, no obstante, no se obtuvo de un único programa, sino de una colección de pequeños programas cada uno de los cuales se diseñó para tratar una faceta específica del problema. En el ánimo de los investigadores que intervenían en el trabajo estaba el que se descubriera un resultado positivo, que hubiera sido más fácil de someter a prueba. Al encontrarse sólo resultados negativos, la posibilidad de errores aumentó.

Sin embargo, Lam confía en sus resultados y la comunidad científica también. Las razones de esta seguridad residen en las pruebas de coherencia interna que el programa tenía: errores simples de cálculo podían detectarse fácilmente. La seguridad descansa también en la intuición matemática. Se ha demostrado, por ejemplo, que si hubiera un plano proyectivo de orden 10 carecería de simetría, algo insólito en un objeto así.

Amén de su interés matemático, el trabajo mencionado pone de manifiesto un punto nuevo de interés sociológico. Después de milenios en los que los matemáticos sólo utilizaban las herramientas mecánicas más sencillas, empiezan a aceptar el ordenador como un útil necesario para mejor abordar problemas complejos. Ningún matemático rechaza ya categóricamente el resultado de un cálculo de este tipo realizado con ordenador, que fue el comportamiento de algunos cuando Haken y Appel anunciaron sus resultados sobre los colores del mapa. Haken, recordándolo con un deje de amargura en sus palabras, manifiesta que ninguno de los matemáticos que en su momento se opusieron a su trabajo por razones filosóficas no se ha desdicho de sus afirmaciones.

En realidad, los computadores son la única forma de progreso en determinadas áreas de las matemáticas. Los estudios de caos y de fractales, por ejemplo, se basan enteramente en el uso del ordenador. Más que proponer teoremas y abordar su demostración, podría decirse que los matemáticos que trabajan en estas disciplinas proponen hipótesis y realizan experimentos.

Para los admiradores de la certeza y la abstracción de la matemática tradicional, los nuevos avances quizá sean desalentadores. En cualquier caso, son inevitables. Aunque algunos matemáticos mantiene una fe casi religiosa en que un teorema simple debe poder demostrarse de una forma simple y corta, según Haken, hay teoremas simples que tienen demostraciones complejas. Para ilustrarlo, basta advertir que, en algunas parcelas de la matemática, la prueba de una sentencia de dos símbolos necesita 16; si es de tres símbolos, se pueden necesitar hasta 256, y si la sentencia supera ocho símbolos podrían precisarse más símbolos que partículas elementales hay en el universo.

Ciencia y empresa

Necesaria cooperación

Al tiempo que los eufóricos elegidos de Bush desempaquetan sus cazos para el café y sus raquetas de tenis, la industria visita a la Administración para someter a su consideración un paquete formidable de problemas económicos, común a muchos países occidentales. Una muestra: el déficit creciente, el bajo ritmo de ahorro e inversión, la baja tasa de crecimiento de la productividad y, sobre todo, la pérdida de la capacidad competitiva. El gobierno debe mejorar radicalmente el clima en los negocios para que las compañías sobrevivan a la dura competencia global.

"La guerra en que estamos embarcados es económica, no militar", declara Robert N. Noyce, director ejecutivo de SEMATECH, consorcio mixto del gobierno y la industria para la investigación en tecnología de fabricación de semiconductores. Los obstáculos a que se enfrentan las compañías —mejorar su tecnología, aumentar sus inversiones en equipo e infraestructura, adaptación profesional de sus empleados— se han hecho abrumadores.

Los directivos empresariales no piden ya al gobierno que proteja esta o aquella industria, este sector o aquel otro. Piden que se ataquen los problemas a los que han de hacer frente todas las empresas: alto coste del capital, coste y riesgo de la investigación y una fuerza laboral deficientemente preparada. Los competidores internacionales, según los industriales, no están maniatados con esos problemas. No se trata de que el gobierno establezca una "política industrial" que seleccione campos para subsidios especiales o que artificialmente haga subir o bajar los precios. Necesitamos un enfoque cooperativo, proclaman.

En tal cooperación, el gobierno diseñaría la política macroeconómica para fomentar una fuerte base tecnológica del sector privado. La mayoría de la gente, entre ellos Erich Bloch, director de la Fundación Nacional de la Ciencia, creen que las medidas necesarias podrían desarrollarse desde los distintos ministerios. La industria, por su parte, habría de aprovechar mejor la nueva tecnología que resultara.

Los cambios financieros que los directivos empresariales desearían son de largo alcance: rebajar los tipos de interés, primar la inversión en investigación y desarrollo, impuestos más bajos sobre las ganancias del capital y menor inflación. "El coste del dinero es demasiado alto y la tasa de ahorro, demasiado baja", se quejan. El coste del capital en los Estados Unidos oscila entre el 8 y el 10 por ciento, mucho más alto que el 3 o 4 por ciento corriente en el Japón, recuerdan los interesados. Cuanto más alto sea el coste del capital, tanto mayor será la presión para producir resultados tangibles. Considerados los costes, las empresas actúan racionalmente al recortar sus gastos de investigación, concluye Roland W. Schmitt, presidente del Instituto Politécnico Rensselaer. Los observadores creen que, fomentando el ahorro, reduciendo el déficit y, consecuentemente, abaratando el precio del capital, el gobierno puede alterar la actitud de la industria ante las inversiones a largo plazo.

Varios departamentos se han puesto a trabajar. Fuentes del Tesoro indican que, a fines del año pasado, el nuevo secretario, Nicholas F. Brady, creó un grupo de estudio para examinar cómo las desgravaciones para investigación y los menores impuestos sobre los beneficios del capital podrían espolear la inversión y el crecimiento a largo plazo. Los funcionarios del Departamento del Tesoro dicen que la primera medida sería animar a los directivos de fondos de pensiones, que típicamente controlan grandes paquetes de valores, para que los conserven durante más tiempo del que ahora es corriente; la iniciativa se dirige a alargar la duración de la inversión en las compañías.

El Departamento de Defensa también ha dado a entender que podría presionar para desempeñar un mayor papel económico. En octubre, el Comité Científico de Defensa, grupo consultor independiente, sorprendió a los expertos al recomendar al Departamento de Defensa que "ampliara su campo de visión y de influencia, más allá de su propia política de adquisiciones, para llegar a los impuestos, comercio y otras líneas de política económica que afectan a la base industrial". Entre otras medidas, el comité sugirió que el Secretario de Defensa formara parte del Consejo de Política Económica del Presidente.

Hasta ahora, el informe se parece más a un rosario de recomendaciones que a un plan de acciones. La industria ha reaccionado con cautela. "Debe aplaudirse al Departamento de Defensa por su valor al hacer suyas tales sugerencias" y por reconocer que los problemas financieros se hallan en el centro de la aptitud de las empresas norteamericanas para lanzar productos con éxito, dice Murrin. El Departamento de Defensa puede no ser la organización más adecuada para guiar al gobierno en cuestiones económicas, añade, pero al menos ha dado un paso adelante.

Al controlar casi el 70 por ciento de los más de 600.000 millones de dólares que los Estados Unidos dedican a investigación y desarrollo, el Departamento de Defensa ha ejercido tradicionalmente más influencia sobre la investigación industrial que ningún otro ministerio. Podría haber llegado la hora del Departamento de Comercio, que habrá de catalizar una mayor cooperación en la investigación entre las compañías, tendencia que se acelerará de todas maneras a medida que las leyes antimonopolio se hagan menos rígidas y la escasez de investigadores se agudice. William L. Keefauver, vicepresidente y consejero general de la AT&T Bell, insiste en la necesidad de una mayor colaboración en la investigación. "Los costos de investigación y desarrollo (de los proyectos más avanzados) están superando incluso la capacidad de AT&T y de IBM para hacerlo solas", dice.

Aun cuando los dirigentes industriales hacen suya la idea de consorcios de investigación, conceden que los proyectos cooperativos tienen todavía que demostrar su valor. Los proyectos de cooperación deberían centrarse en proyectos de investigación "precompetitivos", si bien a veces resulta difícil distinguir entre investigación básica y aplicada. Por ejemplo, SEMATECH se centra en una clase de investigación fácil de compartir: la pericia de fabricación. Muchos fabricantes de microcircuitos integrados compran ya su equipo de producción a proveedores corrientes.

Además de reformas financieras e iniciativas de investigación, la industria cuenta con el gobierno para revisar el sistema educativo. Keefauver dice que la mejora de la escuela primaria y secundaria, así como animar a más estudiantes a emprender estudios superiores de matemáticas y ciencias, debería

ser una prioridad nacional máxima. "Algunos fabricantes afirman que podrían hacer un producto que no fallase casi nunca", se comenta, "pero el factor limitante es la calidad de la masa trabajadora." Sería prudente, pues, que el estado se volcara en la educación, aun cuando suponga alguna demora en los grandes proyectos científicos, como la estación espacial.

Un animal económico

La mayoría de las ratas interesadas en seguir una carrera universitaria suelen optar por psicología. Nadie esperaba, sin embargo, que se les abrieran posibilidades en las facultades de económicas y empresariales.

A lo largo de los últimos diez años, John H. Kagel, de la Universidad de Pittsburgh, y Raymond C. Battalio, de la Universidad A&M de Texas, han empleado ratas y algunos pichones para poner a prueba ciertas hipótesis sobre la elección. Como no está claro que los seres humanos puedan hacer elecciones económicas óptimas conscientemente, dicen los investigadores, el comportamiento animal puede servir de modelo para la elección humana y ayudar a clasificar conflictos en la teoría económica fundamental.

Probar rigurosamente una hipótesis económica no es tarea baladí. Los datos están incompletos o sesgados. Los modelos económicos son generalmente tan simplificados –suponen, por ejemplo, que el consumidor sólo tiene dos mercancías– que es difícil usar las observaciones del mundo real para dar apoyo a las hipótesis. Ya en el decenio de 1940, algunos economistas comenzaron a pergeñar comprobaciones empíricas. Muchos experimentos usan grupos de estudiantes (frecuentemente estudiantes de segundo ciclo de economía) para simular subastas o mercados. Pero Kagel y Battalio observaron que muchos experimentos en psicología se realizaban con animales. Si las ratas y los pichones podían servir para poner a prueba teorías psicológicas, razonaron, ¿por qué no las económicas?

Consideremos, por ejemplo, un reciente experimento que puso a prueba la existencia de "mercancías Giffen", una muy rara contradicción del axioma general según el cual una subida de precios provoca una caída en la demanda. La mercancía Giffen de la que todo estudiante de primer curso de economía oye hablar es la patata irlandesa: durante el hambre en Irlanda, entorno a 1840, en medio del aumento de precio de la patata, los isleños compraron más patatas. (Pese a todo, era el más barato de los alimentos disponibles.) Por el contrario, cuando los precios de la patata comenzaron finalmente a bajar, los irlandeses redujeron su demanda de patatas y se permitieron el lujo de pasarse a la carne. ¿Por qué? El aumento del precio de la patata significaba que no podían permitirse ningún otro alimento.

No obstante, algunos economistas sostienen que el caso de la patata, del que originariamente dio cuenta el economista victoriano Sir Robert Giffen, es en el mejor de los casos anecdótico. "Se busque por donde se quiera," dice Kagel, "los economistas nunca han podido encontrar pruebas inequívocas que confirmen esta frecuentemente citada excepción a la ley de la demanda." Esto es, nunca hasta que las ratas entraron en juego.

Las ratas de Kagel y Battalio viven en jaulas con máquinas vendedoras que sirven cantidades específicas de alimento y líquido cuando los animales aprietan la palanca apropiada. Las seis ratas que tomaron parte en el experimento de las "mercancías Giffen" tenían "presupuestos" específicos (podían apretar palancas un número fijo de veces) y podían gastarlos bien en una mezcla de quinina y agua, o bien en una bebida alcohólica hecha de extractos de raíces de diversas plantas. Los investigadores cambiaban los "precios" de las bebidas alterando la cantidad de líquido que se servía cada vez que se pulsaba una palanca. Como las patatas, la quinina era siempre la mercancía más barata.

Si pueden elegir, la mayor parte de las ratas prefieren la cerveza de raíces a la quinina, dice Kagel. Los investigadores consiguientemente redujeron el sueldo de las ratas, y descubrieron que, de acuerdo con la definición de una mercancía Giffen, tres de los animales pronto comenzaron a beber cantidades apreciablemente mayores de quinina. Cuando el precio de ésta bajó y aquellas ratas se dieron cuenta de que estaban bebiendo más quinina con el mismo esfuerzo, redujeron la quinina y comenzaron a beber cerveza de raíces (las otras tres ratas continuaron bebiendo cerveza de raíces y quinina en aproximadamente la misma proporción, independientemente de los cambios de precio). Tal demanda antiintuitiva demuestra que pueden existir bienes de Giffen, concluyen los investigadores.

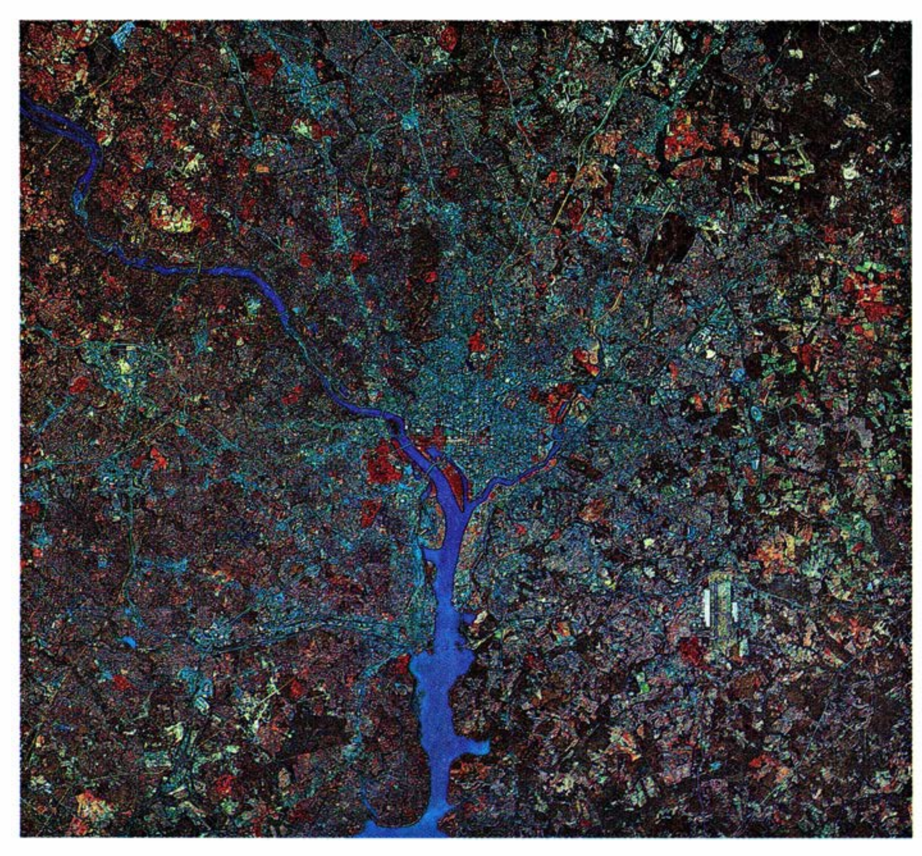
Pese a los éxitos de Kagel y Battalio, no hay muchos otros economistas que trabajen con animales. "Los proyectos experimentales son interesantes y realizados con seriedad", observa Thomas Romer, economista de la Universidad Carnegie-Mellon, que revisó la colección de ensayos *Laboratory Experimentation in Economics* (Experimentación de laboratorio en economía), recientemente publicada por la Cambridge University Press. "Pero la mayoría de los economistas no se inquietarían si los animales no se comportasen de la manera que predicen las teorías."

Teledetección euroamericana

En 1972, los Estados Unidos lanzaron el *Landsat 1*, uno de los primeros satélites civiles destinados a enviar datos e imágenes de la propia Tierra. A principios del decenio de 1980, el gobierno trató de convertir el éxito científico que había auspiciado en un provechoso negocio: vender datos a compañías petrolíferas y planificadores urbanísticos, entre otros usuarios. Parece que la empresa resulta ahora demasiado cara para que la financien sólo los Estados Unidos.

En enero, funcionarios del gobierno estaban a un paso de firmar un acuerdo con sus colegas franceses. El acuerdo, cuyas negociaciones preparatorias comenzarán en junio, se propone unificar los programas de teledetección de los dos países hacia mediados del decenio de 1990. Aunque la teledetección está dirigida en los Estados Unidos por la compañía EOSAT y, en Francia, por la SPOT Image, los dos gobiernos son propietarios de los satélites y de las imágenes sin tratar. Del programa Landsat es responsable la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOOA), división del Departamento de Comercio; en Francia, el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) supervisa los satélites SPOT.

David S. Julyan, vicepresidente ejecutivo de la subsidiaria norteamericana de la SPOT Image, dice que la cooperación entre los Estados Unidos y Francia implicará compartir el proyecto, construcción y costes de lanzamiento de un satélite de teledetección. Este no entrará en órbita antes de 1996. Aunque los funcionarios se hallan todavía lejos de establecer los detalles específicos de una posible colaboración, Julyan espera que sea "un trato al cincuenta por ciento". Una empresa conjunta entre SPOT Image y una compañía norteamericana se encargaría de co-



WASHINGTON, D. C, visto desde la posición del satélite SPOT I. *Los falsos colores ponen de manifiesto la vegetación* (rojo)*, el agua* (azul) *y los edificios* (blanco a azul, según los materiales)*. Cortesía de la empresa* SPOT *Image.*

mercializar los datos, que no tiene por qué ser EOSAT.

Los males actuales de EOSAT seguirían a varios turbulentos años. El gobierno contrató, en 1985, con el grupo EOSAT, recién formado, el comienzo de la comercialización del programa; prometió, asimismo, financiar las operaciones de los *Landsat 4* y *Landsat 5* (lanzados en 1982 y 1984 respectivamente) y construir dos satélites de repuesto y una estación de tierra para la recepción de los datos. EOSAT, a su vez, desarrollaría el mercado para los datos.

Cuatro años después, ha cambiado el telón. Los *Landsat 4* y *Landsat 5* operan más allá de su esperanza de vida. El *Landsat 6*, cuyo lanzamiento estaba originariamente planeado para diciembre de 1988, mediante el transbordador espacial, hubo de reproyectarse para que cupiera a bordo de otros vehículos de lanzamiento, tras el desastre del *Challenger* en enero de 1986. Cada año, la Administración ha recortado su ayuda a EOSAT, para encontrarse luego con que el Congreso restablecía parte de la financiación.

EOSAT hace frente también a una dura competencia por parte de SPOT Image, que ha estado obteniendo altas cualificaciones gracias a sus agresivas técnicas de mercado. Los franceses entraron con retraso en el negocio de la teledetección; el *SPOT 1* se lanzó en 1986. El año pasado, los ingresos de SPOT Image por ventas mundiales igualaron, por primera vez, a los de EOSAT. La compañía francesa ha recibido también una ayuda más continuada por parte de su gobierno. Mientras NOAA y EOSAT tienen que solicitar del Congreso los subsidios para cubrir los costes de operación de los satélites cada año, SPOT Image paga al CNES regalías anualmente negociadas por los datos que vende.

Julyan dice que las regalías cubren sólo parte del coste de los satélites y sus operaciones. Pero a medida que la compañía avanza hacia la total comercialización y va cumpliendo sus objetivos anuales, el gobierno francés se muestra dispuesto a financiar la empresa.

En vista del alto costo del negocio espacial y del todavía pequeño mercado de los datos de teledetección, una colaboración entre los Estados Unidos y Francia podría tener sentido comercial. Pero la creación de una empresa conjunta en parte gubernamental y en parte privada, en la cual los dos países tienen igual participación, será probablemente un trabajo hercúleo, con fuertes connotaciones políticas.

Aplicaciones futuras de los nuevos superconductores

Son necesarios nuevos descubrimientos de la ciencia de materiales para dar cumplimiento real a las esperanzas depositadas en los superconductores de alta temperatura. Una investigación a largo plazo hará más probable el éxito

Alan M. Wolsky, Robert F. Giese y Edward J. Daniels

En los ochenta años que han transcurrido desde que Heike Kamerlingh Onnes descubriera la superconductividad hemos aprendido muchas cosas sobre los superconductores; a pesar de ello, las ideas germinales de Onnes sobre sus aplicaciones permanecen todavía vigentes. Este investigador se asombró al descubrir, en 1911, que el mercurio enfriado por helio líquido a cuatro grados Kelvin perdía toda resistencia eléctrica; dos años más tarde, después de observar la superconductividad en el estaño y el plomo a 4 grados Kelvin, escribió: "Como el estaño y el plomo son materiales que pueden trabajarse fácilmente, puede pensarse ahora en toda clase de experimentos eléctricos con aparatos sin resistencia... La naturaleza extraordinaria de este estado (superconductor) puede explicarse por su relación con el problema de la producción de campos magnéticos intensos mediante bobinas sin núcleos de hierro". Estos núcleos pecan de dos inconvenientes: son pesados y poseen una capacidad limitada para extender el campo magnético de la corriente que circula por la bobina que los envuelve.

ALAN M. WOLSKY, ROBERT F. GIESE y EDWARD J. DANIELS pertenecen al grupo de evaluación técnica de la división de sistemas ambientales y energéticos del laboratorio nacional de Argonne. Wolsky, experto en asuntos energéticos, preside el grupo. Se doctoró en física por la Universidad de Pennsylvania en 1969 y dio clases en la de Temple, antes de ingresar en Argonne. Giese, que es analista de sistemas energéticos, entró en Argonne al poco de recibirse de doctor en física por la Universidad de Stanford, en 1974. Daniels se licenció en la Universidad de Chicago en 1981; Argonne lo contrató como analista de sistemas energéticos.

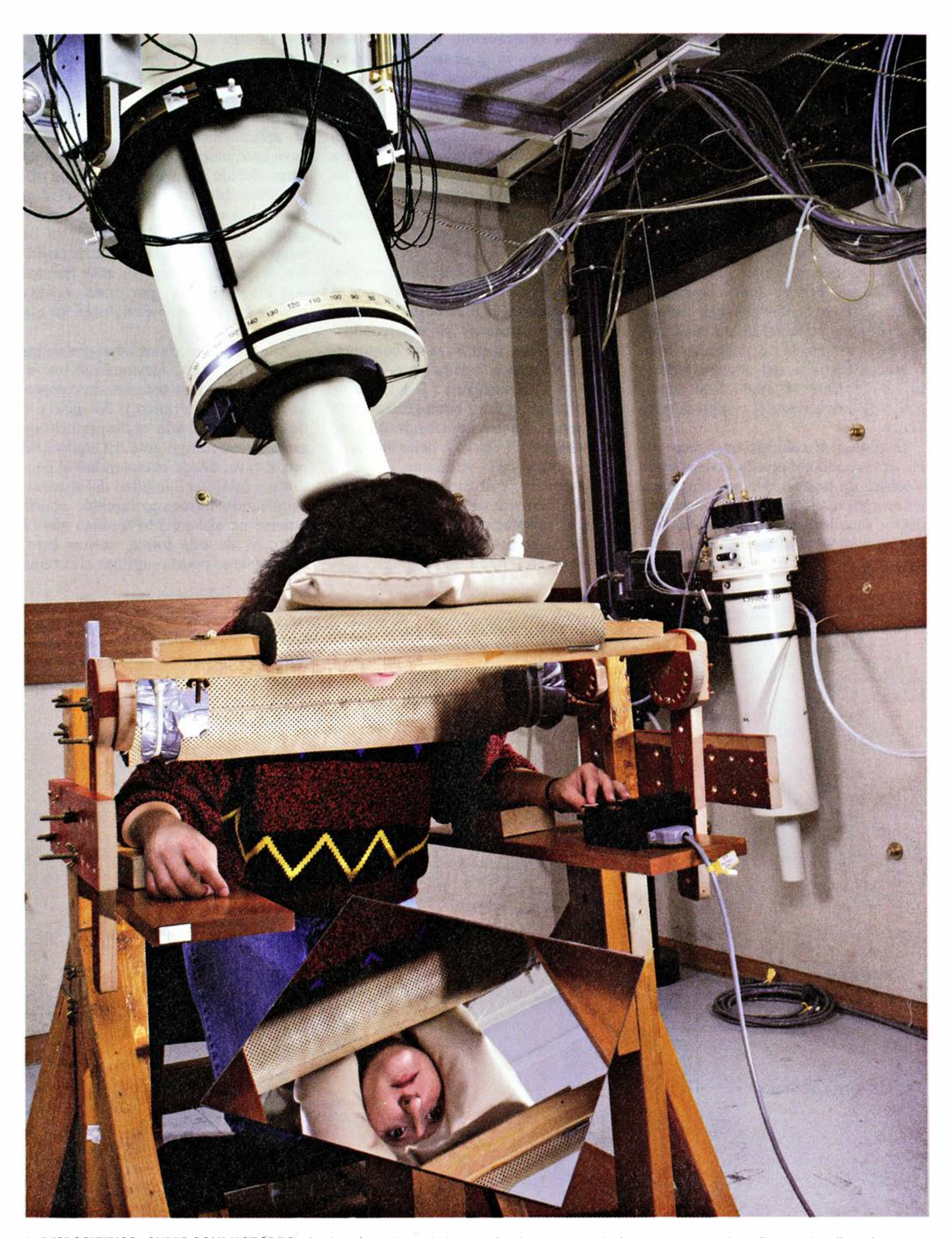
Sin embargo, la esperanza de conseguir imanes superconductores sin núcleos de hierro se frustró, porque ni el estaño ni el plomo en estado superconductor podían transmitir corrientes de suficiente intensidad. Hubo de transcurrir cincuenta años hasta que los investigadores descubrieron que la aleación de niobio-titanio y el niobio-3-estaño podían conducir la corriente necesaria. Pero, al igual que el estaño y el plomo, estos materiales tenían también que enfriarse hasta cuatro grados Kelvin (cuatro grados por encima del cero absoluto) con helio líquido de elevado coste, lo que limitaba mucho sus aplicaciones, Hace dos años, varios grupos científicos de todo el mundo, estimulados por el descubrimiento de un óxido cerámico superconductor, realizado por K. Alex Müller y J. Georg Bednorz en el laboratorio de investigación de la IBM en Zurich, desarrollaron un óxido de itrio-bario-cobre que presenta superconductividad a 90 grados Kelvin. Desde entonces, otros investigadores han encontrado dos familias diferentes de óxidos de cobre, una de ellas que contiene bismuto y la otra talio, que presentan superconductividad entre 110 y 120 grados Kelvin.

Estos superconductores de alta temperatura podían enfriarse a 77 grados Kelvin con nitrógeno líquido, que es barato y abundante. Se ponía así de manifiesto que ciertas aplicaciones de la superconductividad, que durante mucho tiempo no se consideraron económicas ni prácticas, aparecían viables. Muchas de las aplicaciones imaginadas —generadores y motores, almacenamiento de energía, trenes levitados magnéticamente— despiertan las mismas esperanzas a las que se refería Onnes. Seguimos desconociendo si los nuevos materiales admiten fácil manipulación y son susceptibles de adquirir la resistencia y flexibilidad necesarias para conformarlos en cables y otras formas útiles. Tampoco se sabe si sirven para conducir grandes corrientes y trabajar en campos magnéticos intensos.

Los nuevos descubrimientos se revelarán fructíferos según se avance en su diseño para aplicaciones conocidas y en la identificación de nuevas aplicaciones aún no previstas. Estas nuevas aplicaciones pueden tener realmente un gran impacto. Cuando se descubrió, en la década de los sesenta, que el niobio-3-estaño y el titanio-niobio permanecían como superconductores mientras vehiculaban grandes corrientes en presencia de campos magnéticos intensos, nadie previó el uso comercial actual más importante de la superconductividad: la formación de imágenes por resonancia magnética para diagnóstico médico. Dejando a un lado las aplicaciones no previstas, la visión, con conocimiento de causa, de las ventajas económicas y técnicas de los nuevos superconductores encauzará los esfuerzos empeñados en alcanzar las aplicaciones que se pergeñan.

La fría realidad

Muchos elementos pueden ser conductores normales o superconductores, igual que el agua puede ser líquida o sólida. Así, lo mismo que existe una temperatura específica, por encima de la cual el agua es líquida y por debajo sólida, hay también una "temperatura de transición" por encima de la cual una sustancia es un conductor normal y, por debajo, se convierte en superconductora. La presión afecta a la temperatura de transición, de idéntica forma, por seguir con la comparación, que el aumento de presión eleva el punto de congelación del agua. En un super-



1. DISPOSITIVOS SUPERCONDUCTORES de interferencia cuántica (SQUID) instalados en el interior del cilindro blanco que hay encima de la cabeza de la paciente. Los dispositivos detectan los campos magnéticos inducidos por la actividad eléctrica de su cerebro, cuando responde a los estímulos visuales provocados en un espejo. Al contrario de lo que sucede con los campos eléctricos, el cráneo no perturba los campos magnéticos. Esta técnica, llamada magnetoencefalografía, constituye una nueva e importante aplicación de los superconductores de baja temperatura, y quizás también de los de alta temperatura. La fotografía pertenece a S. Varnedoe; se tomó en el laboratorio de Samuel J. Williamson y Lloyd Kaufman, en la Universidad estatal de Nueva York.

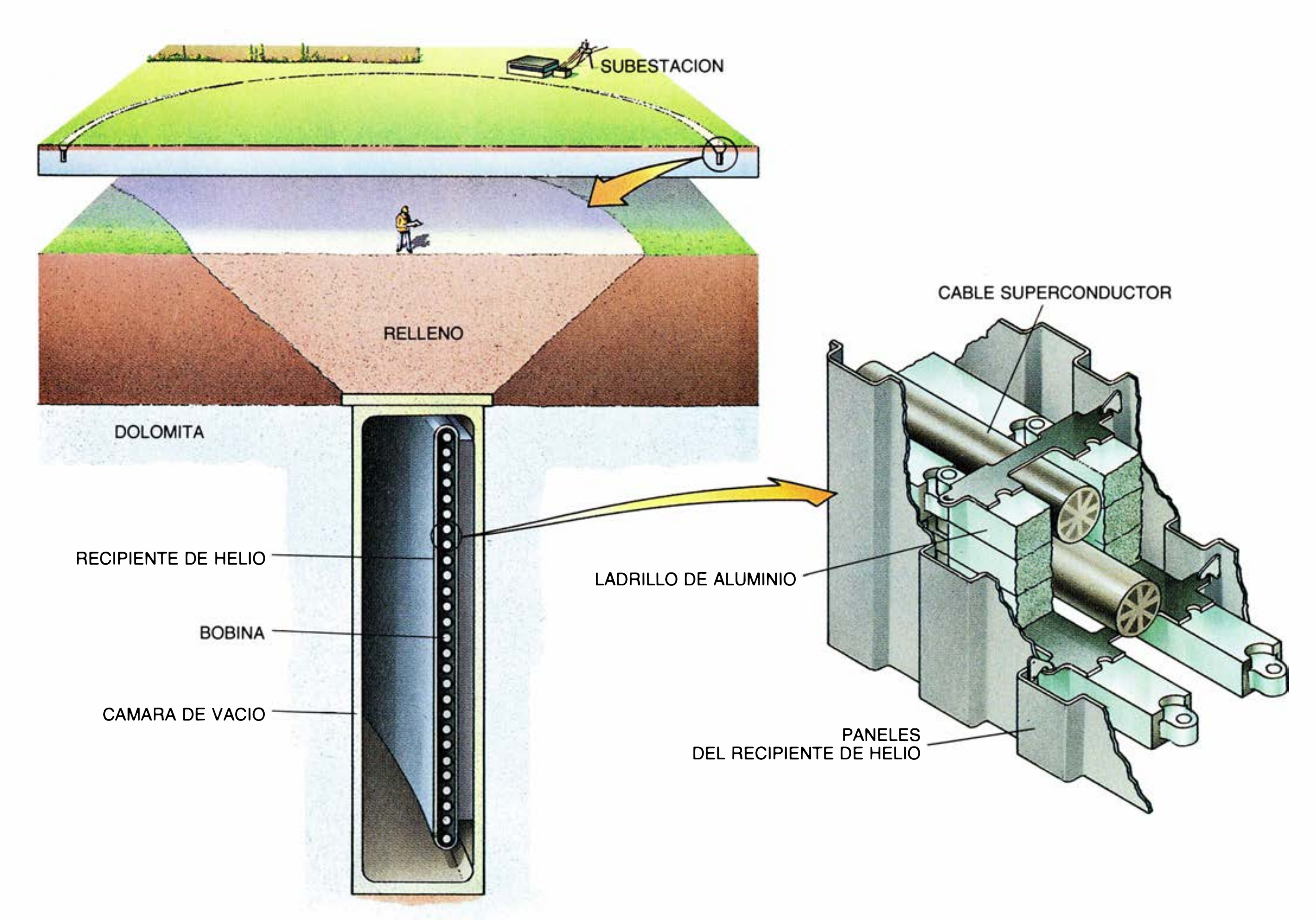
conductor, las corrientes eléctricas y los campos magnéticos alteran también la temperatura de transición —en un efecto crucial para determinar la viabilidad de las aplicaciones de los superconductores.

Los materiales normales tienen resistencia eléctrica, que es una forma de "rozamiento" que hace que los electrones de una corriente eléctrica disipen su energía en forma de calor. Un superconductor, que opone una resistencia cero, puede mantener una corriente continua sin perder potencia o producir calor. (Las corrientes alternas pierden una pequeña cantidad de potencia que es proporcional a la frecuencia de la corriente y depende del tamaño y de la forma del cable, el estado de su superficie y la intensidad del campo magnético.)

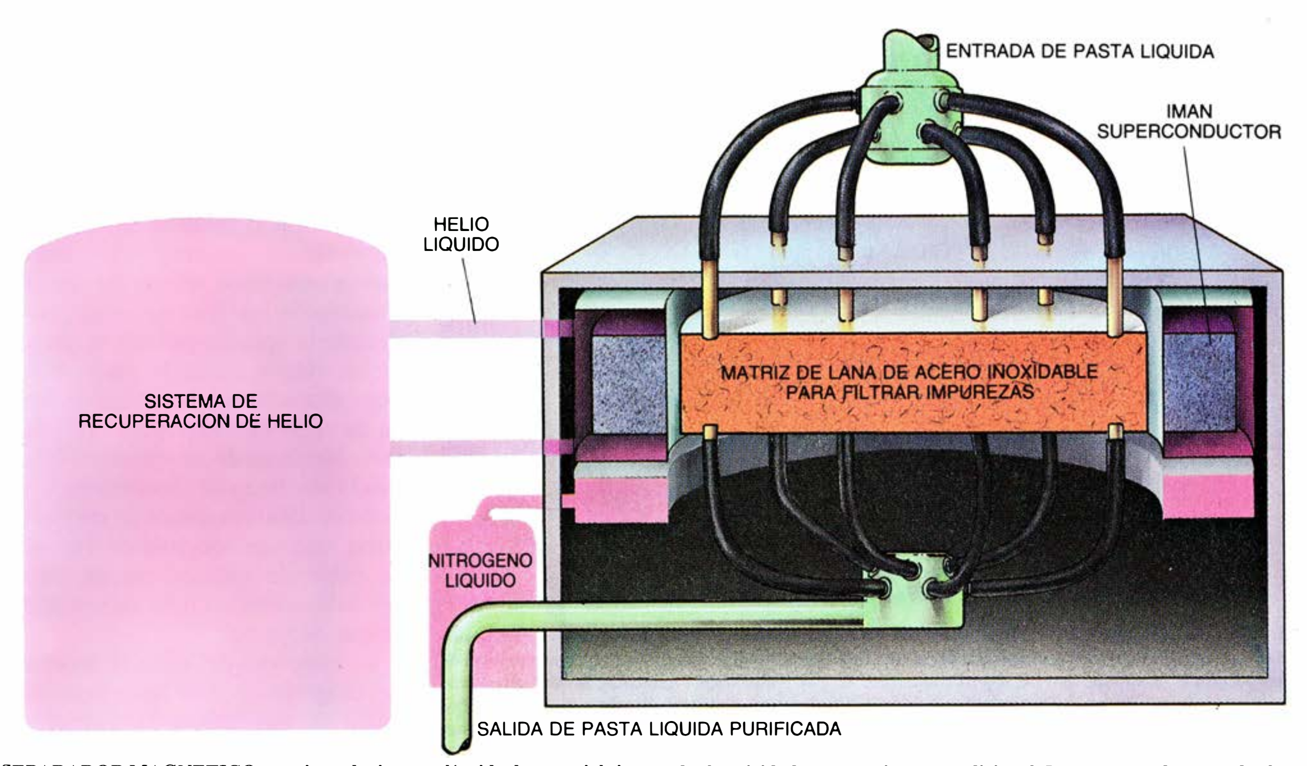
El mismo mecanismo que hace que un superconductor pierda su resistencia eléctrica da lugar a que sea sensible a los campos magnéticos. Si un superconductor se coloca en un campo magnético pequeño y la temperatura desciende por debajo del punto de transición, repelerá bruscamente el campo, actuando como si en su interior hubiera barritas imantadas que disminuyen el campo externo. Este es el famoso efecto Meissner, que causa que un trozo de superconductor levite encima de un imán. Esta misma propiedad permitiría que los superconductores se apantallasen frente a las fuerzas magnéticas, de igual modo que los conductores eléctricos se protegen frente a las fuerzas electrostáticas.

¿Por qué es mejor tener superconductividad a 77 grados Kelvin que a cuatro grados Kelvin? Porque es menos caro. Para mantener un superconductor frío, debe reemplazarse continuamente el líquido refrigerante, ya sea helio (4 K) o nitrógeno (77 K), que se vaporiza por el calor que se filtra desde el exterior. En una hora, un watt de calor evapora 1,4 litros de helio líquido o 0,016 litros de nitrógeno líquido. Reemplazar esta pérdida costaría 50.000 dólares anuales para helio líquido (con un precio actual de 4 dólares por litro), frente a los 35 dólares para el nitrógeno líquido. Para aplicaciones a gran escala, en las que la refrigeración es una parte pequeña del coste, el cambio a nitrógeno líquido no tendría gran repercusión económica. El cambio incidiría, sobre todo, en el coste de las aplicaciones medianas y pequeñas, cuyo enfriamiento con helio es bastante caro, debido a su mayor relación superficie-volumen. En este caso, el ahorro podría constituir una parte significativa del coste total. No se trata de ninguna cuestión baladí. Los dispositivos pequeños suelen ser más baratos que los grandes y, por tanto, resulta más probable que se comiencen los ensayos con ellos.

Además, con los sistemas enfriados por helio líquido, acostumbran los ingenieros a diseñar sistemas de complejo aislamiento térmico y de reciclado de helio, para evitar el desperdicio de este costoso refrigerante. El equipo, de por sí caro, añade complejidad al conjunto y relaja la fiabilidad del sistema. Empleando nitrógeno líquido, podría tenerse un aislamiento térmico menos eficaz y, de esta forma, menos caro, con lo que se podría suprimir el sistema



2. SISTEMA SUPERCONDUCTOR MAGNETICO de almacenamiento de energía (SMES). Dotado de anillos gigantes de cable superconductor, podría almacenar una corriente eléctrica continua indefinidamente. Un sistema de 5000 megawatt-hora y 1000 megawatt tendría que enterrarse para confinar la fuerza magnética generada en la bobina. Una bobina de 24 metros de altura y un diámetro de 1568 metros ejercería una presión de 1100 atmósferas sobre la pared de la caverna. Los cables se encierran en ladrillos de aluminio muy puro. En una "extinción" de emergencia, los ladrillos absorberían la electricidad.



3. SEPARADOR MAGNETICO para introducir pasta líquida de material sin procesar en un tanque lleno de una matriz de lana de acero inoxidable. Como hay un imán que produce un campo magnético uniforme e intenso, las impurezas ferríticas quedan atrapadas en la matriz. Un sistema que utilice imanes superconductores refrigerados con helio líquido consumirá un 95 por ciento menos de electricidad que otro sistema tradicional. Los superconductores de alta temperatura refrigerados con nitrógeno líquido eliminarían el sistema de recuperación del vapor de helio, aumentando, por consiguiente, la fiabilidad y reduciendo la inversión de capital de dos millones de dólares en, aproximadamente, doscientos mil dólares, y el coste de funcionamiento en un diez por ciento.

de recuperación de vapor, obteniéndose mayor simplicidad y fiabilidad.

Superimanes

Los imanes son esenciales en cualquier generador y motor eléctrico. En la industria, levantan y separan productos de hierro y acero y extraen impurezas de arcillas y otros materiales. La más reciente herramienta de diagnóstico médico, la formación de imágenes por resonancia magnética, utiliza un imán superconductor para alinear los núcleos de hidrógeno del cuerpo; pulsos de radiofrecuencia impulsan los núcleos, que se balancean alineadamante como tentempiés. Al oscilar, los núcleos emiten unas señales radiocaracterísticas débiles que pueden detectarse.

La mayoría de los electroimanes se fabrican devanando hilo de cobre aislado alrededor de un núcleo de aleación de hierro. La corriente circula por la bobina e induce un campo magnético dirigido a lo largo del eje de la bobina. Esta sólo puede generar por sí misma un campo pequeño, puesto que el hilo de cobre transporta únicamente alrededor de 400 ampère por centímetro cuadrado. (Si se obliga a circular más corriente a través del hilo, el coste de la eliminación del calor generado por la resistencia del hilo se hace prohibitivo.) El núcleo de aleación de hierro amplifica el campo magnético de la bobina. Los electrones del núcleo alinean sus momentos magnéticos con el campo de la bobina, centuplicando o multiplicando por mil su intensidad; gracias a lo cual, se abarata la producción de campos magnéticos de hasta dos teslas, 40.000 veces el campo magnético terrestre. Es imposible conseguir campos más intensos porque el núcleo se "satura" (se le agotan los electrones que han de alinearse).

Los electroimanes de núcleo de hierro tienen otra desventaja: su peso. A ese metal corresponde la mayor parte del peso de los motores eléctricos y de los generadores. Si se lograra disminuir el peso de la instrumentación de los aviones (y en consecuencia aumentar la carga útil), la reducción podría cifrarse en 1000 dólares por kilogramo ahorrado durante el período de vida de la aeronave. El ahorro crece —alrededor de 6000 dólares por kilogramo— para los cohetes Titan 4 que colocan cargas en órbita terrestre de baja altura.

Los superconductores posibilitan imanes más ligeros y potentes. En su diseño más simple, se puede omitir el núcleo de hierro y hacer que la bobina conduzca una corriente proporcionalmente mayor. Si un núcleo de hierro multiplica por mil el campo generado por una bobina de cobre, entonces, para igualar las características de un imán convencional, el superconductor deberá conducir una corriente mil veces mayor que la que conduce el hilo de cobre, es decir, unos 400.000 ampère por centímetro cuadrado. El niobio-titanio y el niobio-3-estaño alcanzan estas densidades de corriente, pero únicamente a 4 grados Kelvin. En los laboratorios AT&T Bell se han fabricado muestras importantes, (aunque no en forma de cable) de óxido de itrio-bario-cobre que conducen 4000 ampère por centímetro cuadrado a 77° Kelvin, en un campo magnético de una tesla. Sin campo magnético, las muestras han llegado a conducir 17.000 ampère.

Generadores y líneas de suministro

En los generadores eléctricos, la potencia mecánica suministrada por una turbina rotatoria hace girar un imán que induce una corriente eléctrica. Los imanes superconductores podrían aumentar el rendimiento de estos generadores [véase "Superconductores en circuitos de potencia" por T. H. Geballe y J. K. Hulm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1981). En los Estados Unidos y Japón se han construido generadores a pequeña escala que utilizan superconductores de baja temperatura. Está previsto que los grandes

AHORRO DE DOLARES EN EL PERIODO DE VIDA (PORCENTAJE)		
	COMPARADO CON SISTEMA DE BAJA TEMPERATURA	COMPARADO CON UN SISTEMA AL USO
GENERADOR DE 300 MEGAWATT	27	63
TRANSFORMADOR DE 1000 MEGAVOLT-AMPERE	36	60
LINEA DE TRANSMISION DE 230 KILOVOLT, 10.000 MEGAVOLT-AMPERE	23	43
SISTEMA SMES DE 5000 MEGAWATT	5-8	VARIABLE
MOTORES	11	21
SEPARADORES MAGNETICOS	15	20

4. AHORRO DE DOLARES EN EL PERIODO DE VIDA (en porcentaje) de las aplicaciones de los superconductores de alta temperatura, en comparación con los sistemas tradicionales y con superconductores de baja temperatura. Se supone que los superconductores de alta temperatura igualarán las características eléctricas y mecánicas de los superconductores de baja temperatura de niobio-titanio y niobio-3-estaño, costando lo mismo. Los superconductores, refrigerados con nitrógeno líquido, harían que las aplicaciones mostradas fueran económicas a una escala menor; posibilitarían también una amplia gama de aplicaciones.

generadores superconductores alcancen un rendimiento del 99,5 por ciento; los generadores tradicionales llegan ya al 98,6 por ciento en su eficacia. El ahorro anual en el coste de carburante sería aproximadamente del uno por ciento —lo cual es significativo, comparado con el coste anual del generador (una inversión de varios millones de dólares), pero es mínimo frente a la inversión de capital en el resto de la planta de energía eléctrica, que sería unas cien veces mayor.

En la fase de proyecto se ha descubierto una ventaja inédita de los generadores superconductores, difícil de cuantificar en términos monetarios, pero que resulta valiosa. Las compañías eléctricas se enfrentan a un serio problema cuando se produce un cortocircuito: cuando una tormenta eléctrica derriba una línea de suministro. Los generadores de los lugares cercanos giran más rápidamente, destruyendo la armonía con el resto de la red. La compañía debe aislar el cortocircuito rápidamente y reponer los generadores en fase, antes de que giren fuera de control. Por ser más sencillo recuperar el control de imanes con núcleo de aire que con núcleo de hierro, se tendría entonces también más tiempo para remediar el problema.

La tecnología para construir generadores de turbina superconductores existe desde hace una década. ¿A qué obedece, pues, que no haya ninguno en funcionamiento? La respuesta es sencilla. Si el helio líquido es el refrigerante, el coste ecónomico de la refrigeración sólo hace rentables los grandes generadores. Pero la demanda de nuevos generadores grandes en los Estados Unidos ha desaparecido; no hay así ningún incentivo que mueva a investigar en una técnica que no está ensayada. Si hay mercado para generadores pequeños (menos de 100 megawatt); en este caso, la maquinaria realizada con los nuevos superconductores podría competir con las convencionales por dos razones: los sistemas de refrigeración serían menos caros y todo el sistema sería más fiable.

Consideraciones similares se aplican al uso de superconductores para transmitir y distribuir energía eléctrica. Los sistemas actuales, realizados en aluminio o cobre, disipan entre el 5 y el 8 por ciento de la energía generada por las centrales de los Estados Unidos, antes de llegar al consumidor. Por otro lado, el cobre y el aluminio pueden adoptar forma de cable suficientemente fuerte y flexible para poder colgarse entre torres. El aire refrigera el cable y lo aísla eléctricamente sin coste adicional. Un superconductor de "temperatura ambiente", que pudiera colgarse en el aire, sería muy valioso, pero este material todavía no existe. Las líneas de transmisión superconductoras refrigeradas con helio o nitrógeno líquido necesitarían sistemas de contención pesados y rígidos para albergar el necesario aislamiento térmico y eléctrico.

Estos sistemas tendrían que desplegarse a ras de suelo o, más probablemente, enterrados, lo que triplicaría el coste del tendido habitual de líneas de transmisión aéreas. Las líneas de transmisión superconductoras no podrían competir jamás con las aéreas. Sin embargo, las líneas subterráneas superconductoras sí podrían hacerlo con las subterráneas convencionales. Las compañías entierran ahora las líneas de transmisión por razones estéticas, pero cuando la opinión pública se preocupe de los efectos sobre la salud de las líneas aéreas puede aumentar la demanda de sistemas enterrados. El Laboratorio Nacional de Brookhaven ha construido una línea de transmisión a ras de suelo de 1000 megawatt de corriente alterna, con una longitud de 115 metros de cable de niobio-3-estaño enfriado por helio, demostrando así la viabilidad de ese proyecto.

La magnitud del coste económico de la refrigeración sólo hace rentable las líneas de transmisión refrigeradas por helio líquido si conducen cantidades muy grandes de energía. En 1977, cuando la compañía eléctrica de Filadelfia estudió formas alternativas para construir una línea de 10.000 megawatt en la ciudad, los sistemas superconductores se mostraron más o menos competitivos. Sin embargo, no se ha concretado ningún pedido de estas líneas de gran capacidad. Aun cuando existiera una demanda concreta, ninguna compañía se aventuraría en un diseño que no estuviera probado. Los superconductores de alta temperatura podrían permitir la construcción de líneas más pequeñas y más fiables.

Almacenamiento de energía eléctrica

Los superconductores encontrarían una aplicación diferente en cierto dispositivo para proteger las redes de energía contra inesperadas —e inoportunas— sobretensiones. El dispositivo consta de un segmento de línea de transmisión, devanado alrededor de un núcleo de aleación de hierro. Se halla éste también devanado con un cable superconductor que transporta una pequeña corriente continua que mantiene el núcleo completamente saturado. Si hay una sobretensión repentina en la línea de transmisión, el dispositivo prevendrá la propagación de la sobretensión a las zonas indemnes de la red. Los superconductores de alta temperatura podrían rentabilizar la presencia de estos protectores de sobretensión en todo el sistema.

Con frecuencia la demanda de energía eléctrica no está sincronizada con su

disponibilidad. Las centrales nucleares y térmicas de carbón, que funcionan con mayor rendimiento a determinado nivel de producción, deben satisfacer una demanda que varía durante el curso del día. El almacenamiento de energía permitiría que la central retuviera el exceso de energía durante los períodos de producción sobrante y la liberara cuando la demanda superara la capacidad de generación. Un sistema de almacenamiento fabricado con superconductores podría mantener gran cantidad de corriente continua sin apenas pérdidas.

Se ha diseñado una unidad a escala real de almacenamiento superconductor magnético de energía (SMES) para almacenar unos 5000 megawatt-hora de electricidad, capaz de cargarse y descargarse a un promedio de 1000 megawatt. Una unidad SMES tendría un rendimiento del 90 al 95 por ciento (con las pérdidas provenientes de la conmutación entre corriente continua y alterna y de la energía consumida para refrigeración) y tendría una velocidad de conmutación de una fracción de segundo, que no iguala ningún otro sistema. Pero ese sistema costaría mil millones de dólares, amén de constituir un formidable desafío para la ingeniería.

Los diseños de SMES que emplean cable de niobio-titanio y helio líquido necesitan un sistema subterráneo anular, con un radio de unos 750 metros. Para evitar una liberación catastrófica de energía si desaparece la superconductividad, el sistema necesita ladrillos de aluminio muy puro, por valor de 100 millones de dólares, que servirían de sumidero de calor y electricidad. Un sistema SMES refrigerado por nitrógeno líquido aliviaría el coste de la refrigeración, rebajando la inversión de capital alrededor del 3 por ciento. Si el superconductor es también barato, el coste podría caer otro 5 por ciento.

A una escala menor y menos cara, el SMES podría tener una utilización diferente: suavizar la transmisión de la energía generada por fuentes muy erráticas; por ejemplo, una central eólica. Las unidades SMES de este tipo deben conmutar gran cantidad de potencia, pero no tienen que almacenar mucha energía; no necesitan, por ello, costosos sistemas de contención. El laboratorio nacional de Los Alamos trabajó con una pequeña unidad SMES experimental, refrigerada con helio líquido, como amortiguador de transmisión para la Administración de Energía de Bonneville, de 1983 a 1984. Un fallo en el sistema de refrigeración obligó a su retirada; mas, por lo demás, el SMES funcionó bien.

Trenes levitados

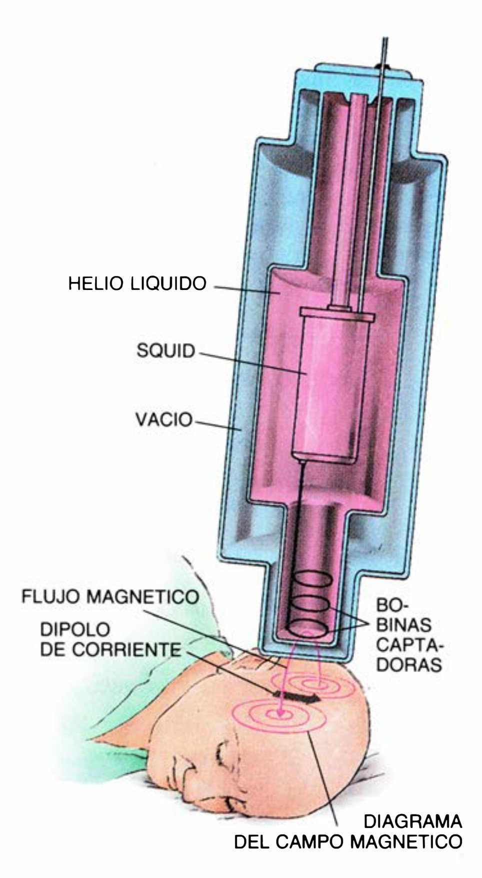
Una de las aplicaciones de los superconductores que ha recibido mayor atención ha sido el tren "maglev" (levitado magnéticamente), que circularía a alta velocidad, suspendido encima de un raíl por fuerzas magnéticas. La idea, propuesta en la década de los sesenta por James R. Powell Jr. y Gordon T. Danby, de Brookhaven, se está ya desarrollando. El "Transrapid" alemán emplea electroimanes convencionales y alcanza velocidades de hasta 400 kilómetros por hora, pero el sistema es inestable y debe controlarse sin cesar por ordenador. Los Ferrocarriles Nacionales Japoneses han estado desarrollando un sistema más estable con imanes superconductores de baja temperatura. Al avanzar el tren sobre las bobinas de aluminio del raíl, los imanes inducen campos opuestos que levitan el tren.

Los superconductores de alta temperatura ofrecerían una mayor fiabilidad de ingeniería para los trenes maglev, pero no reducirían mucho el coste. El coste de la refrigeración bajaría, pero esto sólo justifica una mínima parte de la inversión total de capital y del coste de funcionamiento. Un raíl de 500 kilómetros costaría de 1500 y 4500 millones de dólares. Los vehículos valdrían un 10 por ciento más, y el sistema de refrigeración justificaría sólo un uno por ciento.

¿Atraerían los trenes maglev suficientes viajeros en Occidente para justificar esta gran inversión? La alta velocidad del vehículo podría hacerlo competitivo con el viaje por avión para distancias de 200 a 1000 kilómetros. Si estos trenes comunicaran los aeropuertos, en lugar de los centros de las ciudades, no implicarían un cambio en los hábitos de viaje y ayudarían a aliviar la congestión del tráfico aéreo y a reducir los retrasos que ahora son corrientes en los principales aeropuertos. (El aeropuerto internacional O'Hare de Chicago, el de mayor tráfico de los Estados Unidos, registró más de 12 millones de horas-pasajero de retraso en 1986.) Los inversores deben decidir, sin embargo, si sería más rentable aliviar la congestión del tráfico aéreo con los trenes maglev u otra medida alternativa, como el aumento del número de pasajeros en cada avión (sustituyendo, por ejemplo, los Boeing 727 con el modelo 757).

Las aplicaciones a gran escala de los superconductores en la industria de la energía eléctrica y en la levitación magnética han atraído la máxima atención, pero las aplicaciones a menor escala, sobre todo para diversas máquinas industriales y dispositivos electrónicos, ofrecen mayores posibilidades de amortización, especialmente a corto plazo. Este tipo de aplicaciones disfrutan de un mercado mayor, que tiene un volumen de ventas más firme y resulta más sensible a la innovación.

Los imanes potentes se emplean en la industria para eliminar impurezas de los comestibles y de materias primas como alúmina, calcita y arena. El primer separador magnético superconductor de baja temperatura para uso industrial se instaló en 1986 en la factoría de tratamiento de arcilla de la empresa J. M. Huber. El imán de dos teslas refrigerado por helio necesita unos 60 kilowatt de potencia eléctrica para que funcione el relicuefactor de helio, mientras que un imán convencional con refrigeración de agua necesitaría 300



5. MAGNETOENCEFALOGRAFIA y uso de SQUID para obtener un diagrama de los campos magnéticos inducidos por la actividad eléctrica del cerebro. Se muestra una corriente eléctrica (*flecha gris*) que avanza por el cerebro en una dirección dada. Los SQUID miden las componentes perpendiculares del campo magnético en el cuero cabelludo; estas componentes tienen un valor máximo y mínimo en los dos puntos donde las líneas del campo en forma de bucle penetran en el cuero cabelludo en ángulo recto (*flecha roja*). La distancia entre estos puntos depende de la profundidad de la corriente; el punto medio yace en el mismo radio que la corriente.

kilowatt para superar la resistencia eléctrica y disipar el calor. Sistemas superconductores similares costarían unos dos millones de dólares, en comparación con los 1,6 millones de un sistema convencional; el ahorro de electricidad reintegraría el coste añadido de cuatrocientos mil dólares en dos o tres años. Con los superconductores de alta temperatura el relicuefactor de helio podría eliminarse, ahorrando 60 kilowatt y reduciendo la inversión de capital en 200.000 dólares.

Los imanes superconductores ofrecen también una forma única de alcanzar temperaturas muy bajas. Por debajo de su "temperatura de Curie", las moléculas de los materiales paramagnéticos o ferromagnéticos se alinean por sí mismas con los campos magnéticos, superando los efectos del movimiento térmico aleatorio. Estos materiales se calientan si se colocan en un campo magnético, enfriándose al retirar el campo. Este efecto magnetocalórico puede aprovecharse en una bomba de calor. Sin embargo, para alcanzar unas prestaciones idóneas, necesita un campo de unas diez teslas, que en la práctica puede producirse sólo con un imán superconductor. Los refrigeradores magnéticos han alcanzado en el laboratorio temperaturas de 10^{-6} grados Kelvin; actualmente se están desarrollando para aplicaciones criogénicas espaciales y de defensa.

Los superconductores de alta temperatura podrían extender la refrigeración magnética a los sectores industrial y comercial, especialmente en la industria alimentaria, donde estos dispositivos prometen ser más fiables, más compactos, con doble rendimiento energético y más baratos de funcionamiento a lo largo de su período de vida, comparados con los frigoríficos al uso. Además, como los clorofluorocarbonos que se emplean en los frigoríficos convencionales de compresión de vapor están restringidos, debido a su supuesta influencia en la disminución del ozono atmosférico, la refrigeración magnética puede dar lugar a una alternativa viable.

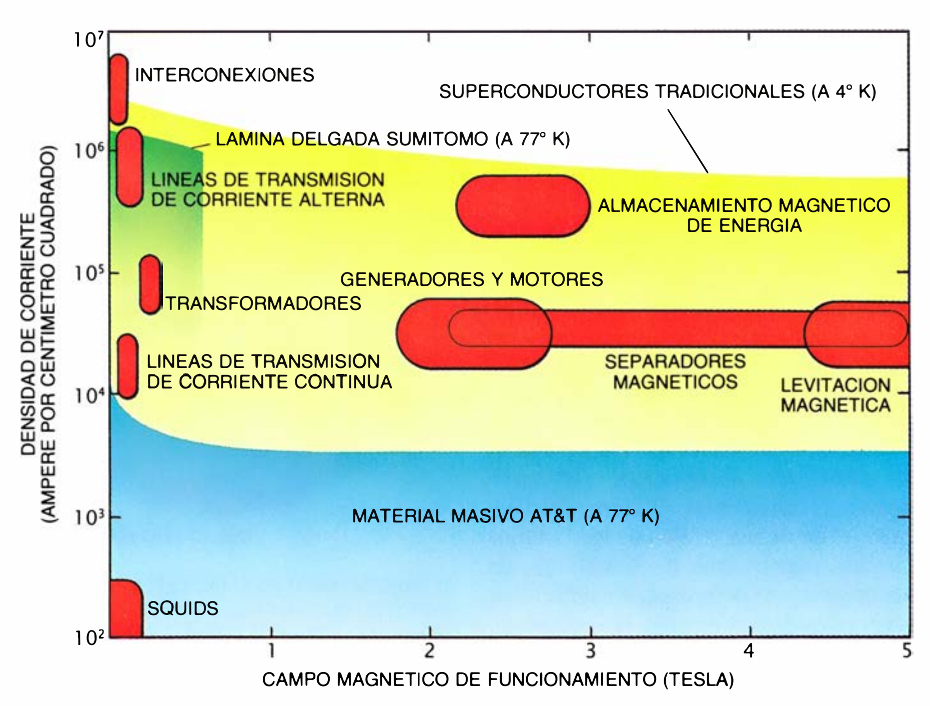
Ordenadores superconductores

Los investigadores han venido soñando con la construcción de un ordenador superconductor desde que, a mediados de la década de los sesenta, los efectos superconductores postulados por Brian D. Josephson, de la Universidad de Cambridge, convergieron en el dispositivo electrónico que lleva su nombre. Las uniones de Josephson, que constan de una capa delgada de material aislante interpuesta entre capas de material superconductor, conmutan tensiones muy rápidamente, mientras que tienen un consumo de energía menor, en varios órdenes de magnitud, que los dispositivos convencionales. Su bajo consumo de potencia prometía ordenadores más compactos, puesto que se necesitaría emplear menos espacio interno para la refrigeración. La compresión de espacio permitiría construir ordenadores más rápidos porque la comunicación entre los diferentes componentes viene limitada por la velocidad de la luz [véase "El computador superconductor", por Juri Matisoo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1980).

En el esfuerzo por construir un ordenador superconductor, IBM invirtió casi dos décadas desarrollando células de memoria, pastillas ("chips") de entrada-salida, interconexiones y circuitos lógicos basados en uniones de Josephson. El esfuerzo fracasó, al no poder desarrollar una memoria "caché" (memoria dedicada al procesador central) pequeña, fiable y de alta velocidad. Entre otros problemas, las células de memoria no podían comprimirse demasiado, porque el flujo magnético en una célula afectaría a las adyacentes. Al mismo tiempo que decaían las expectativas para memorias basadas en uniones de Josephson, las pastillas de memoria semiconductora mejoraban por momentos. IBM dio por terminado su proyecto en 1983.

Las compañías japonesas han continuado trabajando en el ordenador de Josephson. Perfeccionaron las uniones de Josephson basadas en niobio y están desarrollando actualmente componentes que contienen nitruro de niobio, que posee una temperatura crítica mayor y debería deparar circuitos más céleres. Sin embargo, no han logrado aún una técnica fiable para la fabricación de pastillas de memoria Josephson que alojen mil o más células. Mayor dificultad encerrará la fabricación de circuitos de memoria creados con superconductores de alta temperatura, porque los nuevos materiales parecen más delicados de procesar que el nitruro de niobio.

Así, pues, un ordenador de Josephson basado por entero en superconductores de alta temperatura no parece viable. Sí lo sería quizás un sistema híbrido que combine circuitos lógicos de Josephson y memorias semiconductoras, funcionando todo el conjunto a 77 grados Kelvin. De hecho, los circuitos de arseniuro de galio y de metal-óxido semiconductor funcionan mejor a 77 grados Kelvin. Este híbrido aprovecharía, a la vez, las mejores características de semiconductores y superconductores. El desafío consiste en desarrollar materiales y técnicas para construir



6. CARACTERISTICAS DESEADAS DE LOS SUPERCONDUCTORES basados en diseños actuales de los dispositivos; se resumen aquí junto con las cualidades de los materiales existentes. Los materiales deben vehicular corrientes eléctricas de suficiente intensidad y funcionar en campos magnéticos asimismo intensos. El niobio-titanio y el niobio-3-estaño, cuando operan a cuatro grados Kelvin, cumplen los requisitos de todas las aplicaciones, salvo posiblemente los SME. Las características de los superconductores de alta temperatura han mejorado desde la fecha de su descubrimiento, pero deben perfeccionarse todavía más en uno o dos órdenes de magnitud para cubrir la mayoría de las demandas. (Dibujo de Thomas C. Moore.)

uniones de Josephson con los nuevos superconductores y diseñar interfases de alta velocidad entre los superconductores y los semiconductores.

Si pudieran superarse los problemas de fabricación, el tiempo de conmutación de los circuitos de uniones de Josephson podría llegar hasta los 10^{-13} segundos para un superconductor con una temperatura de transición de 10 grados Kelvin, y a 10^{-14} segundos para un material con una temperatura de transición de 100 grados Kelvin. Ninguna técnica convencional es capaz de aproximarse a estas velocidades. Los dispositivos podrían incorporarse en arquitecturas de procesamiento paralelo para superordenadores mil veces más rápidos que los que hay en fase de proyecto. Sin embargo, serán necesarios muchos años de investigación para realizar este ordenador.

En un plazo más corto, los superconductores pueden limitarse a interconexiones que unan entre sí los dispositivos semiconductores. Las señales de alta frecuencia que viajan a través de un hilo superconductor sufren una pequeña atenuación (pérdida de energía) y no experimentan dispersión geométrica. Es más probable que estas interconexiones se empleen en distancias de unos pocos metros, por ejemplo, para conectar los componentes de un ordenador del tamaño de una habitación. Para distancias mayores, es probable que la fibra óptica mantenga su ventaja en coste y prestaciones. No es probable que los superconductores sean ventajosos para conexiones cortas, ni siquiera en una pastilla, donde los tiempos de retardo están determinados principalmente por la impedancia y la capacitancia inherentes del propio dispositivo, no ya por la resistencia de las interconexiones.





7. CINTA E HILO SUPERCONDUCTOR fabricados por Roger B. Poeppel y sus colaboradores del Laboratorio Nacional estadounidense de Argonne. Antes de su sinterización, la cinta (*izquierda*) poseía suavidad suficiente para moldearse en diversas formas; después de su sinterización, adquiere una fragilidad extrema. Se ha logrado un cierto grado de flexibilidad en una bobina sinterizada (*fotografía de la derecha*).

Interferencia cuántica

Las diferentes aplicaciones de las uniones de Josephson se adivinan prometedoras. De hecho, algunas ya existen. El dispositivo superconductor de interferencia cuántica, o SQUID, consta de una o dos uniones de Josephson integradas en una espira de hilo superconductor. El dispositivo es sumamente sensible a cambios en los campos electromagnéticos. El flujo magnético confinado dentro de la espira superconductora se cuantiza, es decir, toma valores que son múltiplos enteros de una unidad básica llamada flujón (alrededor de 2×10^{-7} gauss por centímetro cuadrado). La corriente en el SQUID es una función periódica del total de flujones confinados en la espira; se muestra especialmente sensible ante cualquier cambio del flujo magnético.

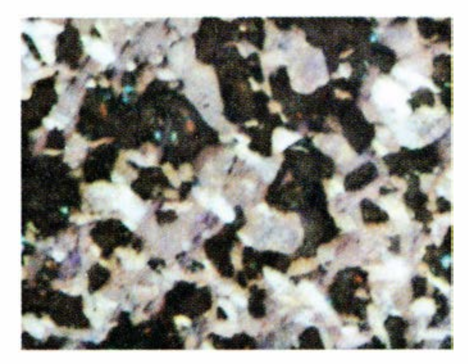
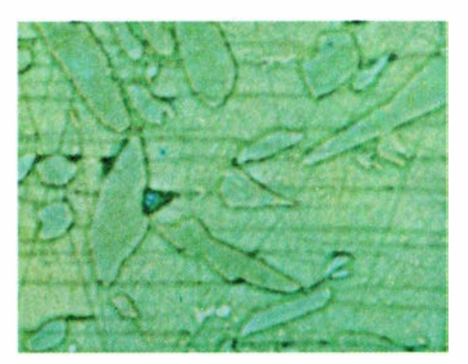
Un SQUID puede medir diferencias de tensión de hasta 10^{-18} volt, corrientes de hasta 10^{-18} ampère (varios electrones por segundo) y campos magnéticos de menos de 10^{-14} teslas (una diez mil millonésima del campo magnético terrestre). Cuando un SQUID trabaja a cuatro grados Kelvin, el ruido térmico queda virtualmente eliminado y su sensibilidad se aproxima a los límites fundamentales impuestos por la mecánica cuántica, a los que no se acerca ninguna otra técnica.

Los físicos emplean los SQUID para buscar partículas extrañas (quarks, monopolos magnéticos y gravitones), así como para comprobar las predicciones de la relatividad general. Los geólogos los utilizan en prospecciones de yacimientos de minerales, agua o petróleo, que producen anomalías locales en el campo magnético terrestre. Estos estudios se llevan a cabo desde helicópteros; los nuevos superconductores permiten idear dispositivos más compactos. Por otro lado, hay más ruido térmico a 77 grados Kelvin, lo que podría enmascarar las señales débiles. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos está desarrollando detectores submarinos construidos con SQUID. En el futuro, estos dispositivos podrán detectar pequeñísimas corrientes iónicas en un metal en proceso de corrosión.

Los SQUID comienzan a encontrar aplicación en la detección de débiles señales magnéticas asociadas con la actividad eléctrica del corazón y del cerebro. La magnetoencefalografía detecta señales cerebrales apenas por encima de 10^{-13} teslas y se halla capacitada para determinar la fuente de la señal nerviosa a escasos milímetros de distancia. Normalmente, estas señales magnéticas disminuyen con la cuarta potencia de la distancia a la fuente; por ello, las bobinas captadoras han de estar lo más cerca posible de la cabeza. Los dispositivos actuales, refrigerados con helio líquido, necesitan, sin embargo, un aislamiento de considerable espesor. Las bobinas fabricadas con superconductores de alta temperatura y refrigeradas con nitrógeno líquido no precisarían esa clase de aislamiento y podrían así acercarse más a la cabeza. El resto del aparato tendría que trabajar a cuatro grados Kelvin para alcanzar suficiente sensibilidad.

Las uniones de Josephson podrían facilitar también un nuevo detector de radiación electromagnética. No se conoce ningún dispositivo electrónico que pueda trabajar dentro de una banda significativa del espectro infrarrojo, entre 10^{11} y 10^{13} hertz. La frecuencia a la que son sensibles los metales superconductores convencionales aumenta con la temperatura crítica. Si se comprueba que esta relación también es cierta para los nuevos superconductores, su temperatura de transición más elevada puede abrir el camino hacia dispositivos capaces de detectar y transmitir en esta zona del espectro electromagnético todavía sin aprovechar.

Las uniones de Josephson han detectado frecuencias de hasta 10^{11} hertz con un rendimiento que se aproxima al límite cuántico; dicho de otro modo, pueden detectar casi todos los electrones que han absorbido un fotón. Ninguna técnica al uso roza esa eficiencia por encima de 10^{10} hertz. Los nuevos superconductores pueden extender el rango hasta 10^{12} hertz. Las primeras aplicaciones pertenecerán sin duda al ámbito militar: radares de alta resolu-

8. TEXTURA DE FUNDIDO que transforma los cristales desordenados de óxido de itrio-bario-cobre (*izquierda*) en cristales alargados (*derecha*). Las finísimas líneas horizontales son los límites de los cristales con textura de fundido. Los granos irregulares dispersos en la superficie no impiden las corrientes eléctricas. La muestra original conducía sólo 400 ampère por centímetro cuadrado, mientras que la muestra con textura de fundido conduce hasta 17.000. El trabajo fue realizado por Sungho Jin en los laboratorios AT&T Bell.

ción, sensores pasivos y comunicaciones espaciales.

Fronteras teóricas

Los físicos describen gran parte del comportamiento de los superconductores apoyándose en la teoría BCS, abreviada así en honor de sus autores John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer, de la Universidad de Illinois. En los conductores normales, los electrones de conducción pierden energía cuando son dispersados por impurezas y por fonones, vibraciones de la red cristalina. Se supone que cada electrón distorsiona la red localmente y crea una región de fuerza atractiva. En un superconductor por debajo de la temperatura de transición, esta fuerza sobrepasa la mutua repulsión electrostática de los electrones, permitiendo formar pares ligados. Además, todos los pares electrónicos ocupan el mismo estado cuántico. Por tanto, resulta imposible que los electrones se dispersen en solitario por las impurezas (porque todos los demás electrones tendrían que hacerlo al mismo tiempo); así el material se convierte en superconductor. La teoría BCS mostró que muchas características del estado superconductor, como la temperatura de transición, podrían relacionarse con unas pocas propiedades, incluida la intensidad de la supuesta atracción.

Los nuevos superconductores ponen en un doble aprieto a ese guión explicativo. En primer lugar, la atracción neta que se obtendría por la estructura de la red de los nuevos superconductores no parece ser de intensidad suficiente para explicar las altas temperaturas de transición. En segundo lugar, el papel de la red se ha cuestionado mediante algunos experimentos que no encuentran ningún cambio en las propiedades superconductoras cuando en la red se reemplaza el oxígeno normal por diferentes isótopos de este elemento. Según la teoría BCS, el cambio de la masa del oxígeno cambia la inercia de la red (y en consecuencia sus frecuencias de vibración); por tanto, deberían también cambiar las propiedades superconductoras. Otros experimentos, sin embargo, han puesto de manifiesto este "efecto isotópico"; ni siquiera hoy vemos con claridad la situación experimental o su interpretación.

Se espera que los pares electrónicos desempeñen un papel importante en los nuevos superconductores: los experimentos muestran que el mínimo flujo magnético que penetra en los materiales corresponde a la presencia de portadores de carga que duplican la carga del electrón. Se acepta que el emparejamiento es necesario para la superconductividad, porque muchos pares ligados de electrones pueden hallarse en el mismo estado cuántico, lo que permite que los pares circulen juntos y se manifieste alguno de los efectos macroscópicos asociados con la superconductividad. No obstante, ha sido difícil construir una teoría convincente que preste soporte a un mecanismo particular de emparejamiento.

A pesar de lo cual, quizá no sea tan decisivo el avance de la comprensión atómica como piensan algunos. No debería esperarse una explicación de los nuevos materiales sólo por la deducción del comportamiento macroscópico a partir de suposiciones microscópicas. El problema puede ser quizás demasiado complejo para permitir estas deducciones. En su lugar, puede ser más fructífera una mezcla artificiosa de suposiciones a escala macroscópica e intermedia (10^{-8} metros), como la establecida por V. L. Ginzburg, Lev D. Landau y A. A. Abrikosov, de la Academia de Ciencias de la URSS, y otros investigadores.

Si los teóricos se centran únicamente en los pares electrónicos y en las redes cristalinas, despreciarán aspectos de la superconductividad que pueden ser más decisivos para sus aplicaciones prácticas. Por ejemplo, las imperfecciones de la red parecen estabilizar el estado superconductor "fijando" grandes campos magnéticos, con lo que se evita la inducción de campos eléctricos que expulsarían del estado superconductor a la corriente que circula. Sería importante comprender por qué ocurre ese fenómeno.

La teoría se encarrilará con la ayuda de los experimentos. Es lo habitual. En particular, importará observar de qué manera los campos dependientes del tiempo afectan a los nuevos superconductores. Los campos y las corrientes que dependen del tiempo son inevitables y omnipresentes: los dispositivos han de apagarse y encenderse, y la energía eléctrica suele suministrarse por corriente alterna. Se necesita conocer cómo responderán los nuevos superconductores en estas situaciones, cuánta energía disiparán y si estas pérdidas pueden remediarse con un diseño adecuado.

Progreso material

El diseño de nuevos superconductores con las propiedades deseables es, como la cocina, más un arte que una ciencia. Las propiedades del hojaldre no se determinan sólo por la proporción entre harina y mantequilla, sino también por la adecuada formación de las capas. De forma similar, las propiedades globales de los nuevos superconductores no dependen sólo de su composición química, sino también del alineamiento de los cristales o de los granos. En especial, el contacto eléctrico entre dos cristales parece depender de cómo éstos se orientan unos con otros.

Las características microscópicas reflejan los métodos macroscópicos mediante los cuales se fabrica el material. En el método estándar de "agitar y hornear", se muelen conjuntamente varios óxidos metálicos en polvo, se comprime la mezcla y después se sinteriza (hornea) en una atmósfera de oxígeno a unos 900 grados C. Los elementos en polvo reaccionan químicamente para formar el nuevo compuesto y se funden en un sólido. En el proceso se producen también compuestos en reacciones parciales que recubren los cristales superconductores, aislando unos de otros; por otra parte, los cristales no están alineados para hacer un buen contacto eléctrico. Una solución es la "textura de fundido", que consiste en fundir el producto sinterizado y con-

gelarlo después. El material resultante tiene un alineamiento cristalino mejor, al tiempo que se apartan los desperdicios intergranulares. Se están investigando otros métodos de preparación.

Los nuevos materiales deben cumplir una formidable serie de requisitos físicos acorde con las aplicaciones esperadas. Deben estar capacitados para transportar corrientes de más de 100.000 ampère por centímetro cuadrado a 77 grados Kelvin. Para muchas aplicaciones, los superconductores deben ser resistentes y suficientemente flexibles, capaces de soportar grandes fuerzas centrífugas, gravitatorias y magnéticas (por ejemplo en los motores y generadores de turbina rotatoria). Además deben ser fáciles de moldear. Aunque el niobio-3-estaño es superior eléctrica y magnéticamente al niobio-titanio, éste encuentra una mayor aplicación porque es más fácil de trabajar.

Otro problema reside en la inestabilidad química de algunos nuevos compuestos: el óxido de itrio-bario-cobre cede oxígeno a los materiales que lo rodean, perdiendo su superconductividad. Para asegurar la estabilidad deben desarrollarse nuevos compuestos ("composites"). Por ejemplo, se podría revestir el material con plata, que no toma oxígeno del superconductor, y después rodear la plata con cobre, que es un material más barato. La tarea no será sencilla, ya que para obtener un compuesto de ésos se necesita una consumada destreza. Los éxitos cosechados en la realización de compuestos de niobio-titanio, cobre y níquel hacen abrigar esperanzas de que características análogas puedan alcanzarse con los nuevos superconductores.

La fabricación de productos útiles —piezas, cables, cintas y películas— constituye un reto formidable. Las películas para dispositivos electrónicos se realizan depositando una tenue capa de los elementos componentes sobre óxido de magnesio y otros sustratos parecidos. Los productos químicos se depositan en forma de vapor, bien por evaporación de compuestos químicos calentados, o por un chorro de vapor producido por láser. Normalmente, la lámina delgada debe recocerse (calentándola repetidamente, con un enfriamiento lento) hasta alcanzar el contenido adecuado de oxígeno. Todas las variables en el proceso pueden afectar al producto final. Los procesos de fabricación de láminas delgadas producen materiales más limpios y mejor alineados. Muchos laboratorios han creado láminas que transportan un millón de ampère por centímetro cuadrado. Algunos investigadores empiezan a considerar la posibilidad de adherir láminas a un material de apoyo, y devanarlo como un rollo de papel de cocina, que resulte en un conductor capaz de conducir grandes corrientes.

Se han fabricado cintas y cables moldeando una mezcla plástica de polvo superconductor. La mezcla se extiende sobre una superficie plana para formar la cinta; para fabricar el cable, se extruye a través de un molde. A continuación, el material se sinteriza y se recuece. Con esta técnica se han obtenido cables que conducen corriente a 77 grados Kelvin. Son todavía muy frágiles, sin embargo. Pero no apagan la esperanza de alcanzar mejores propiedades, como ha ocurrido con el vidrio, tan frágil como en el panel de ventana o tan flexible como la fibra óptica.

Son retos cuya dificultad evoca la asociada al descubrimiento de los nuevos superconductores. La creación de materiales prácticos requerirá un esfuerzo sostenido durante al menos una década, que es el tiempo necesario para que los científicos experimentados desplacen su atención hacia esta nueva iniciativa y para formar a investigadores jóvenes. Los líderes de la investigación industrial de Japón parecen decididos a firmar esos compromisos a largo plazo. Cuatro compañías estadounidenses, AT&T Bell, Bellcore, Dupont e IBM, acometen ya ambiciosos programas de investigación. En todos los países avanzados se requiere más personal y recursos, actualmente dispersos entre el sector privado, laboratorios estatales y universidades, si se pretende que contribuyan, con su conocimiento y habilidad en diversas disciplinas —física, química, ingeniería eléctrica y ciencia de materiales—, a que los superconductores de alta temperatura salten de la promesa a la realidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

APPLICATIONS OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. A. P. Malozemoff, W. J. Gallagher y R. E. Schwall en *Chemistry of High Temperature Superconductors*, editado por D. L. Nelson, M. S. Wittingham y T. F. George. American Chemical Society, 1987.

HIGH TC SUPERCONDUCTORS AND POTENTIAL APPLICATIONS. Comisión de las comunidades europeas, 200 Rue de la Loi, b-1049, Bruselas; julio de 1987.

ADVANCES IN APPLIED SUPERCONDUCTIVITY: A PRELIMINARY EVALUATION OF GOALS AND IMPACTS. A. M. Wolsky et al. Laboratorio nacional de Argonne, Argonne, Ill. 60439; 1988.

SUPERCONDUCTIVITY RESEARCH: A DIFFERENT VIEW. John M. Rowell en *Physics Today*, vol. 41, n.º 11, págs. 38-46; noviembre de 1988.

Del canto de los pájaros a la neurogénesis

El estudio de los centros cerebrales de control del canto de los canarios revela que, en el adulto, nacen células nerviosas que substituyen a otras lesionadas. ¿Encierra esta neurogénesis la clave de la autorreparación del cerebro humano?

Fernando Nottebohm

Si compartiéramos una de las convicciones de la neurobiología más firmemente asentadas durante mucho tiempo, todas las neuronas del cerebro de los vertebrados se formarían en fases precoces del desarrollo; las células nerviosas se irían estableciendo en el decurso del desarrollo cerebral. Creíase que los vertebrados adultos habían de arreglárselas con un número fijo de neuronas. Se suponía, en consecuencia, que las neuronas perdidas por enfermedad o lesión no se substituían; el aprendizaje no implicaba la incorporación de células nuevas en los circuitos nerviosos que controlan el comportamiento, sino que procedía modificando las conexiones entre un número limitado de neuronas.

Joseph Altman, de la Universidad de Purdue, se opuso ya a ese criterio desde comienzos de los años sesenta. Fundándose en experimentos que había llevado a cabo con gatos y ratas, sostenía que sus resultados mostraban que algunos tipos de neuronas seguían formándose en ciertas partes del cerebro animal, aun cuando éste hubiera llegado ya al estado adulto. Pero los resultados de Altman no eran terminantes y la neurogénesis del cerebro de mamífero adulto no recibe todavía la aceptación general. (Llámase neurogénesis al proceso de formación de neuronas.)

FERNANDO NOTTEBOHM es profesor de comportamiento animal en la Universidad Rockefeller, cuyo centro de investigación de etología y ecología dirige. De origen argentino, se trasladó a los Estados Unidos para estudiar agricultura, pero acabó especializándose en zoología por la Universidad de California en Berkeley.

Han aparecido nuevas pruebas que corroboran la realidad de la neurogénesis en otra clase de vertebrados. El descubrimiento se produjo en un campo insólito: al estudiar el aprendizaje del canto por las aves. Las investigaciones acometidas por el autor y varios colegas suyos muestran no sólo el nacimiento continuo de células cerebrales de las aves, una vez alcanzada la madurez, sino también que, en algunos casos, las nuevas neuronas substituyen a otras preexistentes. Si bien ignoramos la función exacta que desempeñan esas nuevas neuronas, sospechamos que se dedican a adquirir nuevas informaciones. El aprendizaje de las canciones, en los pájaros jóvenes y en los adultos, podría depender, pues, de la disponibilidad de neuronas jóvenes con las que crear circuitos nuevos. Estos hallazgos plantean nuevas cuestiones sobre la estabilidad general de los circuitos nerviosos del cerebro. Pero el aspecto más sugestivo de esos resultados estriba en que podrían desembocar, andando el tiempo, en la identificación de factores que estimularan la autorreparación del cerebro humano mediante la substitución de neuronas dañadas por otras nuevas.

Los taxónomos distinguen unos 30 órdenes de aves, que abarcan unas 8500 especies. Casi la mitad de éstas se clasifican en el suborden de los pájaros cantores, Oscines, del orden Passeriformes. Los pájaros cantores suelen distinguirse de otros grupos por su canto, rico y variado. El ave canta para anunciar su presencia a sus cohortes y para establecer un territorio de cría. Los machos suelen hacerlo, además, para atraer a su pareja.

Es bien sabido, desde hace tiempo, que algunos pájaros imitan los sonidos que oyen. Pero antes de los años cincuenta muy pocos biólogos se habían dado cuenta de que los pájaros cantores ejercían dicha facultad de forma rutinaria, para componer sus canciones cotidianas. Lo demostró, y abrió con ello un nuevo campo de investigación, W. H. Thorpe, de la Universidad de Cambridge, al describir cómo el pinzón, una especie europea, aprendía su canción. Crió machos aislados en cámaras insonoras equipadas con altavoces. Repitió, en algunas de éstas, cantos de pinzones, que los jóvenes lograron imitar; resultado que contrastaba con el obtenido por los que no se sometieron a esas pruebas, cuyos cantos pecaban de una anormal simplicidad. Más aún, cuando expuso las aves sin entrenar a las cintas "de aprendizaje", una vez habían ya alcanzado la madurez sexual, no mejoraron su habilidad canora.

Thorpe llegó a la conclusión de que los pájaros aprendían a cantar de forma parecida a como los humanos aprendían a hablar, esto es, imitando los modelos que les proporcionan los individuos adultos. Concluyó, asimismo, que el aprendizaje del canto en el pinzón se limitaba a un "período crítico", anterior a la madurez sexual. Trabajos posteriores de Peter R. Marler, de la Universidad Rockefeller, y Klaus Immelmann, de la alemana de Bielefeld, mostraron que otros dos pájaros cantores, uno norteamericano, el chingolo piquiblanco (*Zonotrichia leucophrys*) y otro australiano, el pinzón cebra (*Poephila guttata*), poseían también su propio período crítico de aprendizaje. Pero no ocurría así con todos los pájaros. Los canarios, por ejemplo, cambian su canción de un año a otro; son, pues, aprendices ilimitados.

Los primeros sonidos que emite el

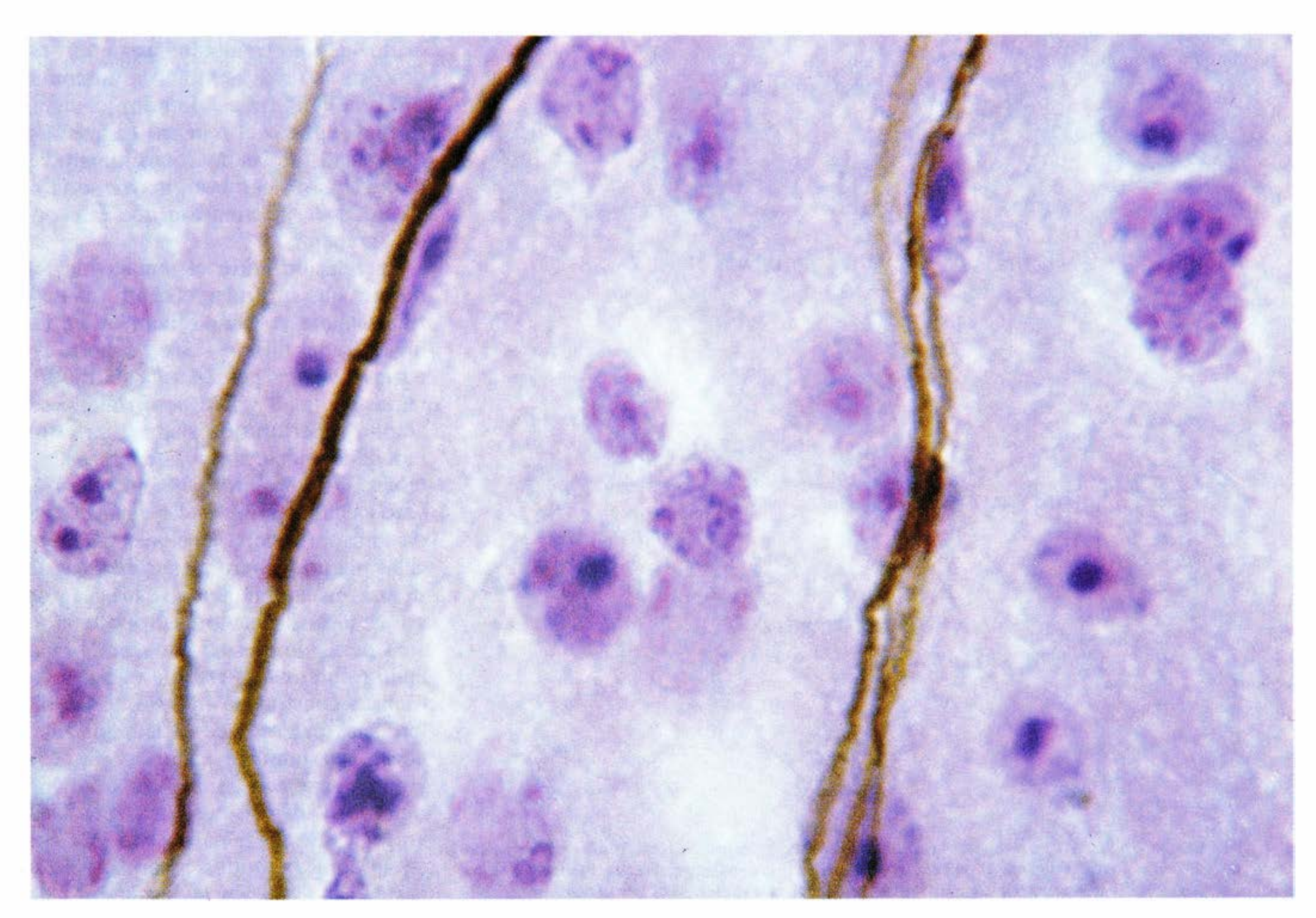
canario recién eclosionado son unos chillidos agudos que mueven a sus padres a alimentarlos. Esta forma de "mendigar comida" continúa incluso después de que los jóvenes hayan abandonado el nido; prosigue hasta que el ave se independiza completamente de sus padres, lo que acontece a las cuatro semanas. A partir de entonces, el pájaro empieza las subcanciones, así se llaman sus primeros ensayos rudimentarios de canto. Las subcanciones tienen poco volumen y son de estructura variable. Se emiten frecuentemente cuando el pájaro parece estar dormitando. Charles Darwin señaló la similaridad entre la subcanción y el balbuceo de los infantes; ambos parecen representar fases tempranas de la práctica vocal, de la que se originará el repertorio completo de sonidos que se utilizan en la comunicación.

Una subcanción se convierte en algo más estructurado hacia el final del segundo mes de vida del pájaro; recibe entonces el nombre de canción plástica. Aunque se acerca al canto de los canarios adultos, resulta todavía bastante variable. A medida que el ave se va aproximando a la madurez sexual, que suele alcanzarse a los siete u ocho meses, las pautas musicales se tornan más fijas y estereotipadas. Los aficionados a la cría de canarios saben muy bien que la calidad del canto de los jóvenes tiene mucho que ver con la calidad de sus compañeros mayores.

El tema final del canario macho adulto, denominado canción estable, se expresa durante la primera estación de apareamiento. Esta canción puede caracterizarse por el número de sonidos distintos (llamados sílabas) que contiene. A pesar de que un canario macho de tres o cuatro meses de edad puede ya vocalizar un 90 por ciento de las sílabas que utilizará cuando sea adulto, las sílabas no se convierten en estereotipos hasta la madurez sexual. No parece que les resulte fácil la consolidación de los estereotipos, si consideramos que invierten varios meses de práctica, los correspondientes a la fase de canción plástica.

Ahora bien, ni siquiera después de ese período de ejercicio adquiere el canario, de forma definitiva, el repertorio de sílabas. Cada año, durante el final del verano y el otoño (después del período de apareamiento), se pierde la maestría en el uso de los estereotipos aprendidos meses antes; la canción se torna tan inestable como la plástica de los jóvenes. Muchas de las sílabas dominadas desaparecen del "vocabulario" básico de canciones, mientras se adquieren otras que podrán incorporarse en una canción estereotipada durante el invierno y la primavera siguientes. De ese modo, los machos canarios adultos pueden desarrollar un repertorio nuevo de canciones cada año. Es probable que el aprendizaje estacional venga determinado por el equilibrio hormonal, puesto que las fases más intensas de suma de nuevas sílabas están precedidas por una menor concentración de testosterona, hormona sexual masculina, en la sangre.

Por el tiempo en que Thorpe llevó a cabo sus experimentos con los pinzones, no se sabía nada sobre las zonas del cerebro de las aves que controlan el

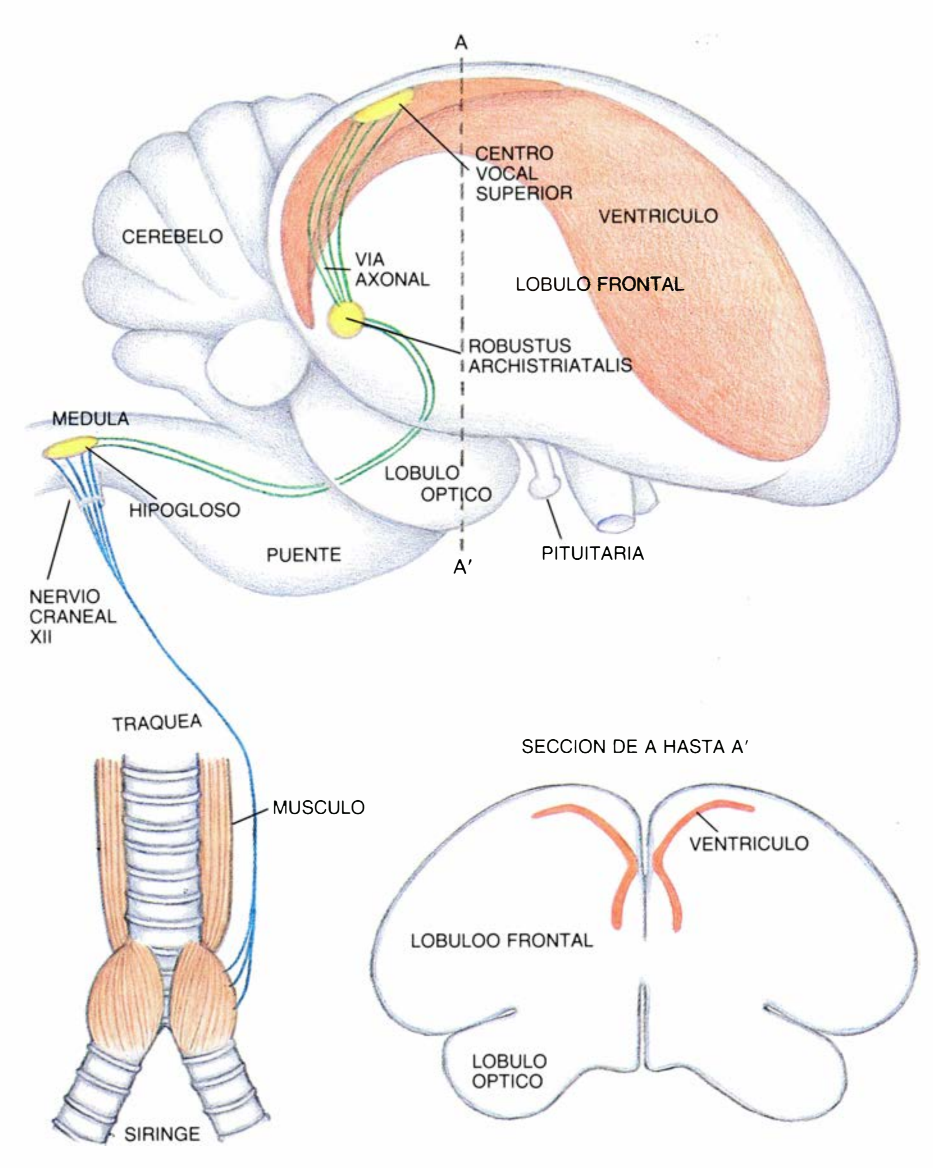


1. NEURONAS RECIEN NACIDAS: adoptan una forma alargada típica en su viaje por el lóbulo frontal del cerebro del canario. En un comienzo, las neuronas siguen las fibras largas (*coloreadas aquí en marrón oro*) de las células gliales radiales, un tipo celular común del cerebro de las aves. Las neuronas nuevas, lo mismo que las viejas, se destacan gracias a la tinción púrpura del núcleo celular. Podemos apreciar dos células viajeras, instaladas en fibras distintas.

aprendizaje del canto. Hasta 1976 no se identificaron, en mi laboratorio de la Universidad Rockefeller, grupos de células anatómicamente diferenciadas, que controlan el canto de los canarios. Estas agrupaciones celulares constituyen los núcleos. (Término que no debe confundirse con el núcleo celular, que encierra el material genético de la célula.)

El núcleo mayor, el centro vocal superior (CVS), reside en la región frontal del cerebro. Los axones de muchas células del CVS —largas prolongaciones de las neuronas— se despliegan hasta otro núcleo frontal, el robustus archistriatalis (RA). Muchas neuronas del RA poseen, a su vez, axones que establecen contacto con las neuronas motoras hipoglósicas que inervan los músculos de la siringe, órgano que produce el sonido [*véase la figura 2*]. Los núcleos cerebrales difieren bastante entre sí; podemos calcular, con precisión, su volumen y relacionarlo con el sexo y la edad de cada sujeto, así como con el nivel hormonal en sangre y la complejidad de la canción. A pesar de que el cerebro de un canario joven alcanza el tamaño adulto entre los 15 y 30 días después de la eclosión (lo que coincide aproximadamente con el momento en que se independiza de sus padres), el CVS y el RA siguen creciendo varios meses más, casi hasta el momento en que el pájaro alcanza la madurez sexual. Durante ese período de crecimiento del CVS y el RA, los jóvenes aprenden, por primera vez, a cantar.

En 1976, Arthur P. Arnold (a la sazón en la Universidad Rockefeller) y el autor descubrieron que el tamaño del CVS y del RA triplicaba o cuadruplicaba, en machos adultos que cantan canciones complejas, el tamaño de esos núcleos en las hembras, que cantan canciones más elementales. Parecía que el volumen cerebral dedicado a una capacidad específica era notablemente mayor en aquel sexo que destacaba en dicha habilidad. Este ejemplo de dimorfismo sexual refutó otra creencia arraigada según la cual los cerebros de los vertebrados no presentaban diferencias anatómicas importantes entre sexos.

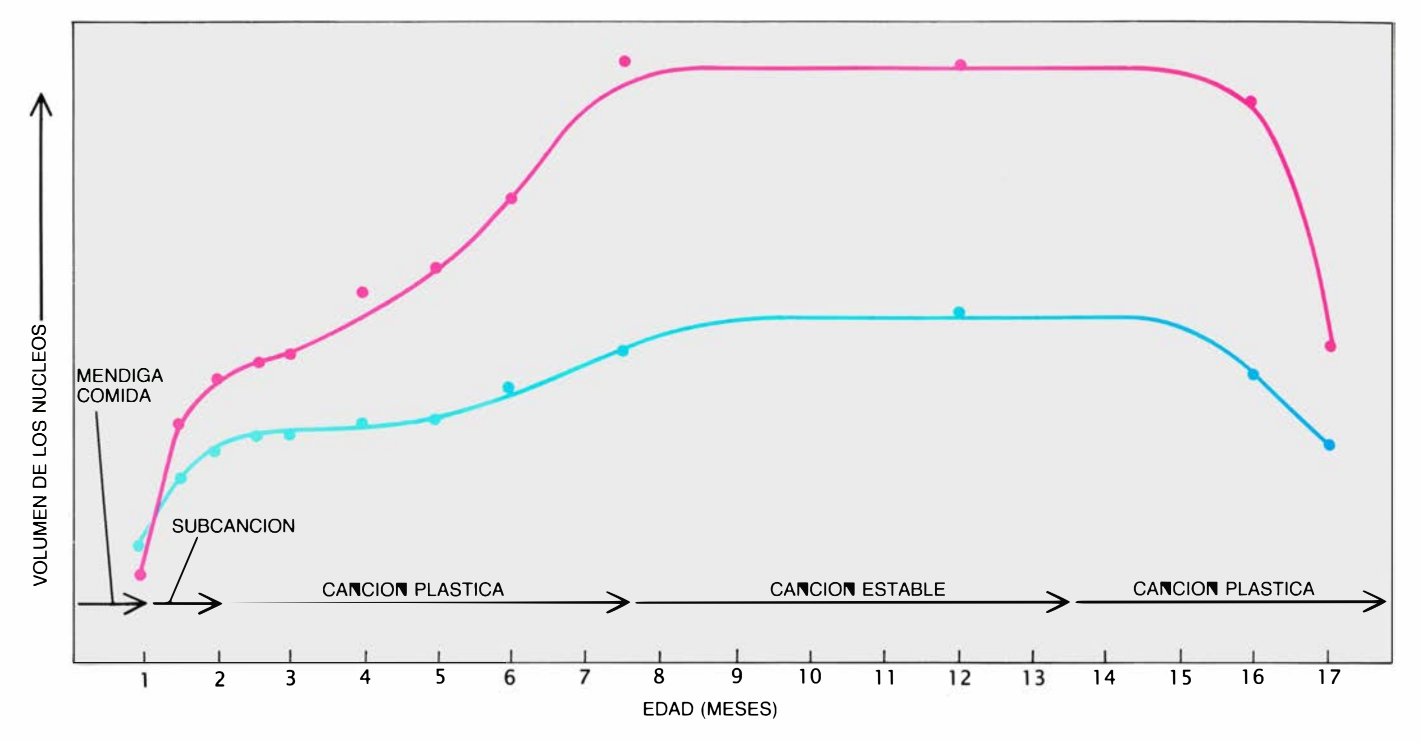


2. CEREBRO DE CANARIO, en sección lateral (*arriba*) y en sección transversal (*abajo, a la derecha*); posee varios núcleos, o grupos diferenciados de células, que controlan el aprendizaje del canto. El mayor de estos núcleos se denomina centro vocal superior (CVS). Las señales electroquímicas del CVS se transmiten hacia otras partes del cerebro, a lo largo de los axones, extensas prolongaciones de las neuronas. Muchas neuronas del CVS tienen axones que se extienden hasta células nerviosas de otro núcleo de control del canto, el robustus archistriatalis (RA). Los axones de muchas neuronas del RA establecen, a su vez, contactos con las neuronas motoras del núcleo hipoglótico que inerva los músculos de la siringe, el órgano donde se produce el sonido.

Trabajos posteriores llevados a cabo por Mark Gurney y Masakazu Konishi, del Instituto de Tecnología de California, mostraron que el dimorfismo sexual de los RA surgía, al menos en parte, de la diferencia en el número de neuronas que encerraban y que estas diferencias se manifestaban ya en fases tempranas del desarrollo; antes incluso de que empezara el aprendizaje del canto. Estos resultados sugieren un proceso a través del cual la anatomía cerebral limitaría el aprendizaje: cuanto mayor fuera el número (y quizá la diversidad) de las neuronas integradas en un circuito nervioso, mayor sería la cantidad de información que éste podría manejar.

La relación entre el tamaño de los núcleos que controlan el canto y la destreza canora se cumple también en individuos del mismo sexo. Algunos canarios machos poseen una extraordinaria habilidad y han desarrollado un amplio repertorio de sílabas; en estos individuos, los CVS y RA suelen ser notables. Otros pájaros de la misma raza, sexo y edad, criados en las mismas condiciones, producen canciones más sencillas, de un número menor de tipos de sílabas; en estos individuos, los CVS y RA suelen alcanzar menores proporciones.

A pesar de que uno se siente inclinado a inferir que las diferencias anatómicas constituyen la base de las diferencias patentes en la habilidad canora, hay también canarios con CVS grandes que poseen, sin embargo, un repertorio silábico muy limitado. Una analogía entre el tamaño de los núcleos de aprendizaje en los canarios y el espacio disponible en las estanterías de una biblioteca puede ayudar a entender esta relación. Si una biblioteca ha de alojar muchos volúmenes necesitará



3. DESARROLLO DE LA CANCION en canarios macho; se acompaña de un notable incremento en el volumen del CVS (*rojo*) y el RA (*azul*). El canto del canario atraviesa cuatro fases distintas: mendigar comida, subcanción, canción plástica y canción estable. El estadio de mendigar comida consiste en gritos agudos y estridentes; dura unas cuatro semanas. En la fase de subcanción, el canario intenta, por primera vez, cantar; los sonidos producidos son de bajo volumen y variables. La canción plástica está más estructurada que la subcanción, sin dejar de ser variable. Cuando el pájaro alcanza la madurez sexual, a los siete u ocho meses de edad, la canción plástica adquiere, progresivamente, caracteres estereotipados hasta alcanzar la fase final. La fase de la canción estable dura el período de cría, al final del cual el ave torna a la canción plástica. Esta regresión se acompaña de una reducción del volumen del CVS y el RA. El proceso de transición de la canción plástica a la canción estable y de nuevo a la canción plástica, junto con los correspondientes cambios en el volumen de los núcleos, se repite anualmente en el pájaro adulto. La verdad es que los volúmenes del CVS y el RA en un canario macho adulto, a finales de verano, se parecen al volumen de los núcleos respectivos de un canario de tres meses. Ahora bien, llegada ya la primavera siguiente, los núcleos han recuperado de nuevo su volumen total.

bastantes anaqueles; ahora bien, las estanterías de una gran biblioteca no tienen por qué estar completamente llenas. (De hecho, en determinadas condiciones la llegada de nuevos "libros" puede aumentar el "espacio de estantería". Las observaciones de Sarah Bottjer de la Universidad de California meridional y Arnold, hoy en la de California en Los Angeles, sugieren que el acto de aprender a cantar puede, por sí mismo, aumentar el tamaño del cvs.)

El análisis estadístico de las correlaciones entre la cuantía de repertorio de sílabas y el tamaño de los cvs en los canarios machos adultos muestra que sólo un 20 por ciento de la variabilidad del repertorio puede atribuirse al tamaño de los cvs. El aprendizaje del canto en los canarios parece estar condicionado por otros factores, además del tamaño del cvs y el RA. Ello no contradice las observaciones llevadas a cabo en mi laboratorio y en otros lugares, según las cuales el número de neuronas en el cvs y el RA (reflejado en las dimensiones físicas de estos núcleos) incide en la destreza con la que cantan los canarios.

Se han obtenido otras pruebas de la importancia del tamaño del cvs y el RA en la determinación de la destreza en el canto, a partir de los efectos de la testosterona. Es posible, por ejemplo, provocar cantos parecidos a los del macho en una hembra adulta silenciosa mediante inyecciones intramusculares de testosterona. Además de activar los circuitos nerviosos existentes, esta hormona dobla el volumen del cvs y el RA en el cerebro de la hembra. De forma similar, en los machos adultos los niveles de testosterona en sangre son muy altos en primavera, cuando su canto ha adquirido pautas estereotipadas, y son más bajos a principos de otoño, cuando su variabilidad semeja la peculiar de los jóvenes. Al mismo tiempo, el cvs y el RA tienen en primavera un tamaño aproximadamente doble del que presentan en otoño.

En 1981, con Timothy DeVoogd, que trabajaba entonces en la Universidad Rockefeller, estudié el proceso por el que la testosterona inducía el crecimiento del RA en aves adultas. (Carecemos de información sobre la manera en que esta hormona aumenta el volumen del cvs.) Lo dijimos antes, las neuronas, más abundantes en el RA, mandan largos axones que se conectan con neuronas motoras hipoglóticas que inervan la siringe. Del cuerpo principal de estas neuronas brotan ciertas ramificaciones secundarias, las dendritas; como cabía esperar, son más largas en los machos que en las hembras. Sin embargo, en las hembras de canario a las que inyectamos testosterona, las dendritas crecieron y se tornaron indistinguibles de las propias de los machos. Al desarrollarse, las dendritas establecían también más contactos o sinapsis con otras neuronas.

¿Qué sugerían esos cambios anatómicos? Pues que un aumento en el nivel hormonal o la adquisición de un nuevo comportamiento (como cantar), o ambas cosas a la vez, intervenían en el adulto para reorganizar la distribución de conexiones entre las neuronas que controlan el comportamiento. Este tipo de modificaciones en los circuitos nerviosos existentes podrían explicar los notables cambios que se han observado en el volumen del RA y justificar por qué los machos de la experiencia cambiaban su canto en su fase adulta. Los machos de otras especies, como el chingolo piquiblanco y el australiano aludido, que aprenden su canción antes de la madurez sexual, no muestran

cambios significativos en el volumen del RA adulto.

Los cambios estacionales del volumen del CVS y el RA, así como los operados en el curso del desarrollo, observados en canarios machos y los inducidos por la testosterona en hembras adultas (en el volumen del CVS y el RA) sugieren que el control del aprendizaje de canciones no es un proceso simple, sino que require cambios notables en los circuitos cerebrales. Los cambios estacionales y hormonales registrados en el tamaño de los núcleos de control del canto eran extraordinarios, para un vertebrado adulto; hasta tal punto, que mis colaboradores y yo nos vimos obligados a formular una pregunta atrevidísima en determinados círculos neurológicos: ¿implicaban esos cambios siempre al mismo conjunto de neuronas, es decir, las que estaban presentes en el cerebro después de la madurez sexual?

Existe un modo sencillo para determinar cuándo nacen células nuevas. El ADN, la sustancia de la que están hechos los genes, se encuentra esencialmente en el núcleo celular; la célula que está a punto de dividirse sintetiza nuevo ADN. En consecuencia, si uno inyecta en un animal una forma radiactiva de timidina, un precursor del ADN, la timidina queda secuestrada en el interior de los núcleos de las células que están a punto de dividirse. Cuando una célula marcada con timidina se divide, la mitad del ADN radiactivo se encontrará en el núcleo de cada una de las células hijas, marcándolas también.

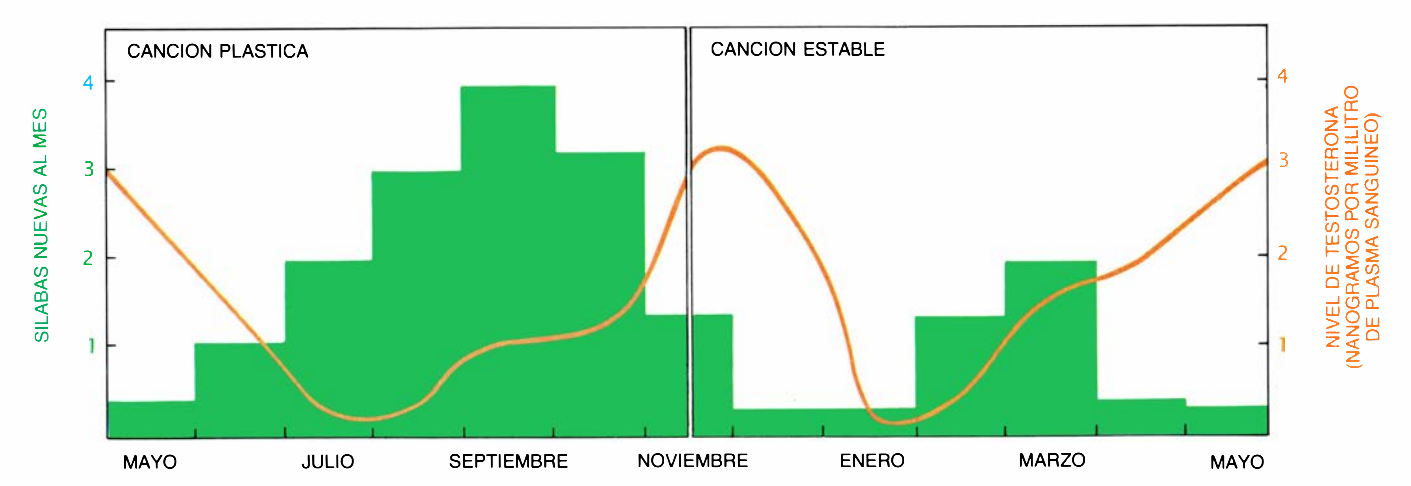
Con Steven A. Goldman inyecté timidina radiactiva en machos y hembras de canarios adultos, diariamente y durante varios días; interrumpimos luego las inyecciones y dejamos transcurrir un mes. Nos sorprendió, al examinar los CVS de las aves, encontrar que el 1 por ciento de las neuronas del CVS había quedado marcado por cada día que los pájaros habían recibido las inyecciones. En otro experimento examinamos los cerebros de canarios adultos, al día siguiente de que hubieran recibido una inyección de timidina radiactiva; no encontramos neuronas marcadas en el CVS, pero sí hallamos muchas células marcadas en la llamada zona ventricular, que yace encima del CVS, formando la base del ventrículo lateral.

Estos resultados sugerían que las neuronas nuevas del CVS habían nacido en el momento del tratamiento con timidina y que se habían formado a partir de células originadas fuera del CVS, en la zona ventricular. Parecía que las células de la zona ventricular se habían dividido en células hijas que habían emigrado hacia el CVS; aquí, transcurridos 20 o 30 días, se convertían en neuronas. Es habitual que las neuronas aparezcan en la zona ventricular durante el desarrollo, en las aves y en los demás vertebrados; por tanto, la neurogénesis que se produce en el adulto viene a ser la permanencia (un rasgo característico) del desarrollo.

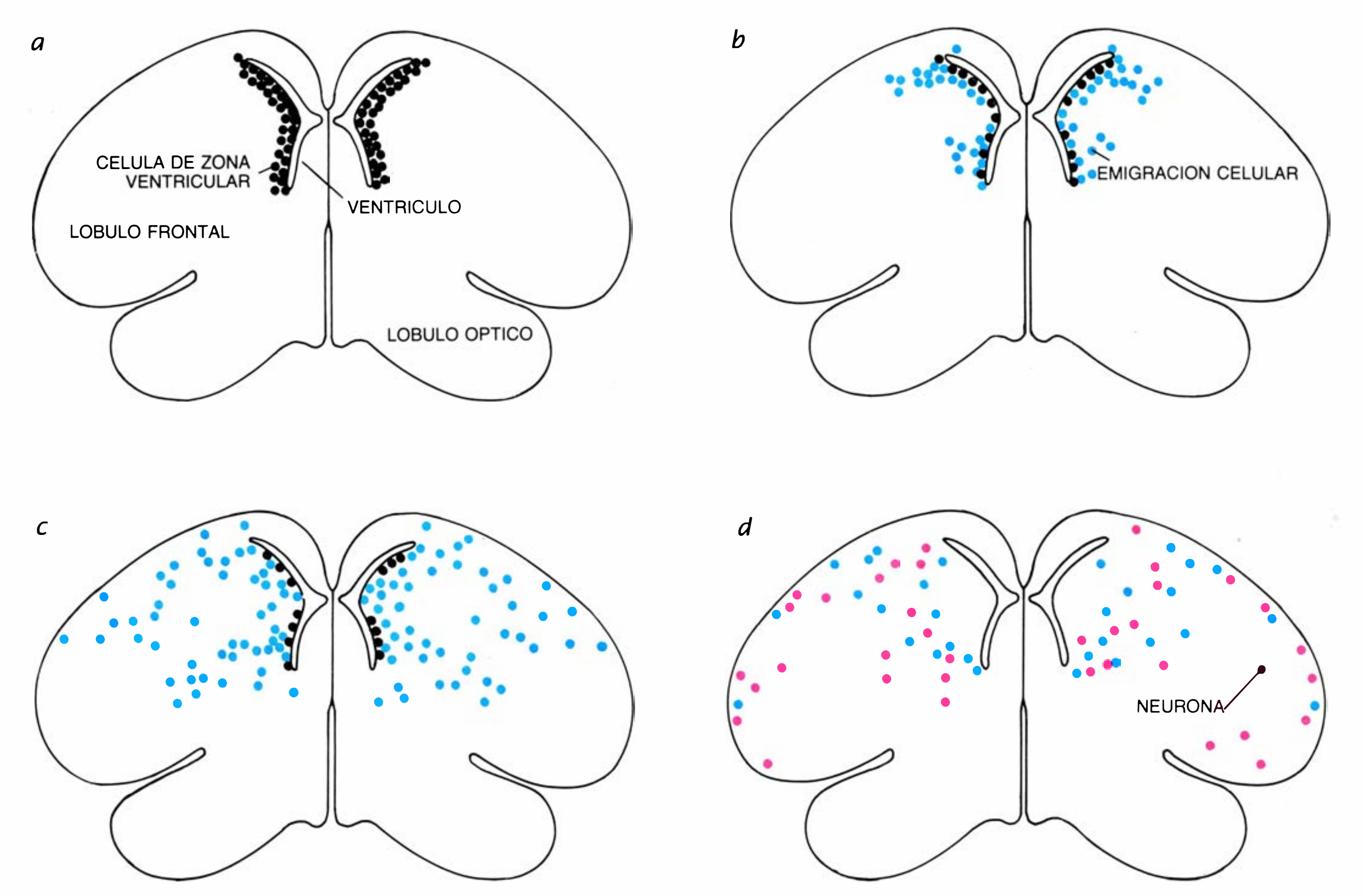
Las neuronas que se desarrollan de las células de la zona ventricular no se distinguen, por su morfología, de otras neuronas normales del canario adulto. Con Gail D. Burd demostré que las neuronas nuevas del CVS establecían contactos sinápticos. John A. Paton y el autor mostraron que las células nuevas generaban señales eléctricas típicas si las estimulaban otras neuronas. Resultaba, pues, evidente que las nuevas neuronas se conectaban con la red existente de circuitos nerviosos a medida que se iban incorporando en el CVS adulto.

Estudios posteriores pusieron de manifiesto que, constantemente, se añaden nuevas neuronas al CVS de los canarios machos y hembras adultos. ¿Por qué, entonces, no crece el CVS en el decurso de los años? La respuesta obvia es que las neuronas nuevas sustituyen a otras viejas, que se eliminan a buen seguro. Pero también las recientes pueden ser sustituidas en este proceso de renovación. Mis colaboradores y yo hemos encontrado muy pocas neuronas marcadas en el CVS ocho meses después de la inyección de timidina radiactiva, lo que implica que la mayoría de estas células tiene una vida media no superior a ocho meses. Los cambios en la tasa con la que se generan neuronas nuevas y mueren las viejas podrían contribuir a los cambios estacionales en el volumen de los núcleos de aprendizaje del canto mencionados antes: el número de neuronas del CVS disminuye en un 38 por ciento al final de la estación de cría, para recuperarse del todo en la primavera siguiente.

El reto inmediato con el que se enfrentan los investigadores consiste en averiguar qué neuronas se eliminan y por qué. A pesar de que la neurogénesis y la sustitución de neuronas se descubriera en una parte del cerebro adulto del canario, implicada en el control del canto, no resulta claro, en modo alguno, cuál es el papel que de-



4. VARIABILIDAD ANUAL DEL CANTO (*verde*) en canarios machos adultos. Dicha variabilidad guarda relación con el nivel de testosterona en sangre (*naranja*); la testosterona es una hormona sexual masculina. El canto de un canario se caracteriza por el número de sonidos distintos (llamados sílabas) de que consta. Cuando un pájaro se encuentra en la fase de canción plástica, no ha fijado todavía una canción estereotipada y suele incorporar nuevas sílabas a su "vocabulario". Esa adición va precedida de una caída en el nivel de testosterona en el torrente circulatorio. De forma inversa, cuando los niveles de testosterona en la sangre son altos, y el canario se encuentra en la fase de canción estable, se incorporan pocas sílabas nuevas al repertorio. (Dibujo de Patricia J. Wynne.)



5. MIGRACION Y DIFERENCIACION de las neuronas. Se representa en estos mapas realizados sobre una serie de secciones transversales de un cerebro de canario (*véase la figura 2*) un día (*a*), seis días (*b*), 15 días (*c*) y 40 días (*d*) después del nacimiento de las células nerviosas. Los mapas están basados en los datos obtenidos por Arturo Alvarez-Buylla y el autor del artículo en sus experimentos realizados con pájaros inyectados con timidina radiactiva, un precursor del ADN. La timidina es secuestrada por las células que van a dividirse y se transmite a las células hijas que quedan, en consecuencia, marcadas.

sempeñan las neuronas nuevas en el aprendizaje de canciones. Tenemos, así, que el porcentaje de neuronas marcadas en el cvs por día de tratamiento con timidina radiactiva es, por lo menos, tan alto en hembras silenciosas como machos canoros. Eso, en los canarios. En la especie australiana de gorriones, se han encontrado neuronas marcadas en el cvs de machos adultos que habían sido inyectados con timidina radiactiva después del período crítico, época en que hay aprendizaje de canciones.

A tenor de estas observaciones, parece poco probable que las neuronas añadidas al cvs sean sólo componentes de los circuitos que controlan las habilidades motoras necesarias para aprender canciones. De hecho, determinados experimentos fisiológicos sugieren que el cvs no sólo tiene una función importante en la producción de canciones, sino que también ejerce, probablemente, una función crítica en el reconocimiento de canciones, es decir, una función perceptora. Puesto que el cvs podría actuar de reserva de memorias perceptivas, la adición de nuevas neuronas al cvs podría ser necesaria para que los pájaros reconocieran canciones nuevas. De la misma manera que los machos cantores deben adquirir antes una memoria perceptiva de una canción modelo para luego imitarla, las hembras, como los machos una vez transcurrido el período crítico de aprendizaje de canciones, deben adquirir memorias perceptivas de canciones nuevas para reconocer los cantos de sus parejas o de otras aves.

¿Por qué los pájaros cantores deben reponer, sin solución de continuidad, las neuronas de su cerebro? Después de todo, los humanos desarrollan sus capacidades motoras y perceptivas con un número limitado de neuronas irremplazables. Los cambios en las sinapsis de las neuronas existentes podrían suministrar la flexibilidad necesaria en los circuitos nerviosos para la adquisición de nuevos elementos en la memoria.

El trabajo llevado a cabo en mi laboratorio corrobora la existencia de cambios sinápticos en determinados puntos del sistema de control del canto, como los RA, donde es posible que estén relacionados con el aprendizaje motor. Ahora bien, cabe que esa flexibilidad no resulte suficiente para otros tipos de aprendizaje. Las pruebas aportadas por otros laboratorios sugieren que el tipo de señales que una célula del cerebro recibe puede determinar qué genes se expresarán, lo que interesa a la identidad de la célula y a sus funciones. En algunos casos, estos cambios genéticos pueden inducir un tipo de aprendizaje irreversible. Es decir, ciertas clases de neuronas relacionadas con el aprendizaje de canciones podrían hallarse expuestas a una modificación constante de acuerdo con la información que van almacenando. El número de neuronas disponibles en el cerebro de las aves podría, pues, suponer un límite para el repertorio a aprender. En consecuencia, la sustitución periódica de neuronas en el cvs vendría urgida para actualizar la memoria perceptiva de canciones de las aves canoras.

La neurogénesis en el cerebro de las aves adultas no se limita al cvs, por más que ésta sea la única parte del sistema de control del canto que presenta dicho fenómeno. Lo cierto es que se extiende por buena parte del lóbulo frontal del cerebro de las aves. Y en lo que aquí importa, conviene destacar que a la parte frontal del cerebro se le atribuye el control de comportamientos aprendidos complejos.

Aunque se ha hablado de procesos neurogenéticos en algunos mamíferos adultos, su ocurrencia parece mucho más limitada, amén de más controvertida. ¿Por qué resulta tan patente en las aves? Quizá guarde alguna relación con su esperanza de vida, relativamente larga, y su régimen de vida en un medio aéreo. Un canario pesa tanto como un ratón, pero vive 10 veces más. Si un pájaro tuviera que cargar con todas las células cerebrales que necesitará para procesar y almacenar la información recogida a lo largo de toda su vida, su cerebro debería ser notablemente mayor y más pesado.

La amplia dispersión frontal de la neurogénesis, en el cerebro de los canarios, plantea otra cuestión importante. ¿Cómo encuentra la nueva neurona su camino desde la zona de origen hasta su instalación definitiva en el circuito nervioso? La respuesta puede resultar bastante sencilla para las neuronas que emigran hacia el cvs como destino final. Por generarse en la zona ventricular que se encuentra encima del cvs, las neuronas han de salvar distancias no superiores a medio milímetro antes de alcanzar su alojamiento final. Ahora bien, algunas neuronas recientes, halladas en otros lugares de la parte frontal del cerebro de las aves, se descubren a cinco o seis milímetros del lugar potencialmente generador más próximo. ¿Qué pistas guían a una joven neurona en su emigración por el cerebro adulto hasta un destino que dista 100 veces la longitud de su propio cuerpo?

Con la ayuda de Arturo Alvarez-Buylla, he observado que las neuronas jóvenes que parten de la pared ventricular adquieren una forma alargada y a menudo siguen las fibras de las células gliales radiales, que abundan en el cerebro joven, en fase de desarrollo, de los vertebrados, así como en la región frontal del cerebro de las aves adultas. A pesar de que el cuerpo de las gliales radiales está localizado en la pared ventricular, sus fibras se extienden hacia la masa principal de materia gris frontal. Después de varios días de migración, la neurona joven se despega de la fibra. Pensamos que esto ocurre cuando una neurona nueva se acerca a la zona donde se supone que va a tomar su forma adulta y convertirse en parte del circuito preexistente. Sólo un tercio de esas células viajeras acabarán transformándose en neuronas funcionales; el resto desaparecerá. La emigración de la célula dura sólo unas semanas; cabe la posibilidad de que las neuronas migrantes que pierden su camino durante el viaje o que no consiguen encontrar su lugar en un circuito nervioso, en esa fase, terminen por perecer.

Nuestro trabajo ha demostrado que —a pesar de lo que sostenía una arraigada doctrina neurobiológica— las células cerebrales de ciertos vertebrados adultos son reemplazables. Pueden nacer neuronas en el adulto, viajar a través del cerebro y ocupar un lugar en los circuitos nerviosos que dan cuenta de los procesos de aprendizaje. Si ese mismo proceso aconteciera en el cerebro humano, resultaría valiosísimo para la reparación de circuitos interesados por lesiones o enfermedades.

Pero no hay pruebas que avalen la presencia de la neurogénesis en el hombre u otros primates. Quizá la razón estribe en que los humanos progresan con los recuerdos de sucesos pasados y la sustitución de neuronas cortaría tales recuerdos. Ello no obstante, cabría la posibilidad de inducir la neurogénesis en cerebros adultos donde no suele darse de manera normal. Después de todo, los mismos genes que orquestan la neurogénesis en el cerebro inacabado de un joven deben encontrarse en las células del cerebro del adulto. La cuestión consiste en identificar estos genes y activarlos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEURONS GENERATED IN THE ADULT BRAIN ARE RECRUITED INTO FUNCTIONAL CIRCUITS. John A. Paton y Fernando Nottebohm en *Science*, vol. 225, n.º 4666, págs. 1046-1048; 7 de septiembre de 1984.

HORMONAL REGULATION OF SYNAPSES AND CELL NUMBER IN THE ADULT CANARY BRAIN AND ITS RELEVANCE TO THEORIES OF LONG-TERM MEMORY STORAGE. Fernando Nottebohm en *Neural Control of Reproductive Function*, editado por Joan M. Lakoski, J. Regino Perez-Polo y David Rassin. Alan R. Liss, Inc., 1988.

MIGRATION OF YOUNG NEURONS IN ADULT AVIAN BRAIN. Arturo Alvarez-Buylla y Fernando Nottebohm en *Nature*, vol. 335, n.º 6188, págs. 353-354; 22 de septiembre de 1988.

Los efectos químicos de los ultrasonidos

Cuando las ondas ultrasónicas atraviesan los líquidos, se forman cavidades que aumentan de tamaño hasta que implosionan, liberando gran cantidad de calor. Estas condiciones extremas configuran un singular entorno químico

Kenneth S. Suslick

Durante las pruebas iniciales del primer destructor británico, llevadas a cabo en el año 1894, Sir John I. Thornycroft y Sydney W. Barnaby advirtieron intensas vibraciones procedentes de la hélice del destructor. Achacaron la causa de las mismas a burbujas o cavidades de gran tamaño originadas por el movimiento de la hélice, que implosionaban como consecuencia de la presión del agua. Thornycroft y Barnaby diseñaron de nuevo la hélice del buque con el fin de amortiguar esas vibraciones, producidas por un proceso que dio en llamarse cavitación, pero la importancia del fenómeno aumentó paulatinamente a medida que la armada británica iba construyendo sistemas de propulsión más rápidos. En 1917 la marina encargó a Lord Rayleigh que estudiara este asunto. Lord Rayleigh confirmó que las vibraciones debíanse a la enorme turbulencia, calor y presión que originaba la implosión de las cavidades citadas. Aunque el fenómeno de la cavitación sigue siendo una fuente de problemas para los ingenieros navales, ha proporcionado a los químicos un ambiente singular para llevar a cabo reacciones de alta energía.

Después de todo, la química no es sino la interacción entre materia y energía. Las fuentes de energía particulares limitan las posibilidades de los químicos en lo concerniente al control de la reactividad de la materia. La luz interacciona con la materia a una escala temporal corta para energías elevadas, mientras que el calor interacciona en escalas temporales mayores para energías bajas. La interacción entre sonido y materia a través del proceso de cavitación pone al alcance de los químicos un intervalo de energías en escalas temporales no disponibles en otras fuentes.

Generalmente los químicos no inducen este fenómeno mediante una presión mecánica, sino con el paso de ondas sonoras de gran intensidad a través del líquido. Estas ondas crean regiones de compresión y expansión, alternas, capaces de producir burbujas de 100 micras de diámetro. Las burbujas implosionan violentamente en menos de un microsegundo, calentando la materia que contienen hasta unos 5500 grados Celsius, una temperatura semejante a la de la superficie del Sol.

El primer químico que cayó en la cuenta de los efectos peculiares que se ponen de manifiesto cuando una intensa onda sonora atraviesa un líquido, que englobamos bajo el nombre de sonoquímica, fue Alfred L. Loomis. A pesar de que estas primeras observaciones fueron realizadas hace ya tiempo, exactamente en 1927, el desarrollo de la sonoquímica fue bastante modesto. El renacimiento de esta disciplina tuvo lugar en la década de los ochenta, poco después de la aparición de generadores de ultrasonidos de alta intensidad, baratos y fiables. (Los ultrasonidos se definen por la frecuencia superior al umbral de audición humano, es decir, frecuencias por encima de los 16 kiloherz, que son 16.000 ciclos por segundo.)

Los ultrasonidos se utilizan en los hospitales para la obtención de imágenes de interés médico; en la industria, para soldar plásticos y limpiar materiales, e incluso en el hogar, en alarmas antirrobo o vaporizadores. Sin embargo, ninguna de estas aplicaciones se sirve de los efectos químicos de los ultrasonidos. Los ultrasonidos permiten multiplicar la reactividad de los polvos metálicos por más de 100.000. Los ultrasonidos congregan esas partículas a tal velocidad que producen su fusión en el punto de colisión y generan llamas microscópicas en líquidos fríos.

Estos efectos químicos de los ultrasonidos se producen en virtud de los procesos físicos que crean y promueven el desarrollo e implosión de cavidades de gases y vapores en los líquidos. Las ondas de ultrasonidos, lo mismo que todas las ondas sonoras, consisten en ciclos de compresiones y expansiones. Los ciclos de compresión ejercen una presión positiva en el líquido, empujando las moléculas unas contra las otras; los ciclos de expansión ejercen una presión negativa, separando las moléculas.

Durante el ciclo de expansión, una onda sonora de intensidad suficiente puede producir cavidades. Un líquido se mantiene unido gracias a la existencia de fuerzas atractivas, que determinan la tensión superficial de dicho líquido. Para que se forme una cavidad, es necesario que se produzca una presión negativa muy grande, asociada con el ciclo de expansión de la onda sonora, con el fin de superar la tensión superficial del líquido.

El valor de presión negativa necesario para desencadenar este proceso depende del tipo de líquido y de su pureza. En los puros, las tensiones superficiales son tan elevadas que los generadores de ultrasonidos de que se dispone en la actualidad no proporcionan una presión negativa suficiente para dar lugar a cavidades. Por poner un caso, en el agua pura se requeriría una

KENNETH S. SUSLICK es profesor de química de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Aunque se formó en el Instituto de Tecnología de California, recibió el doctorado, en 1978, en la Universidad de Stanford. Premio de Investigación del Instituto Nacional de la Salud, ha sido profesor visitante en Oxford. Experto en sonoquímica, se interesa también por el papel de los metales en los sistemas biológicos. Es un apasionado de la música popular y de la escultura en bronce.

presión negativa de más de 1000 atmósferas, cuando los generadores de ultrasonidos más potentes apenas son capaces de producir presiones negativas de unas 50 atmósferas. Sin embargo, la tensión superficial se puede reducir con el gas que queda atrapado en los recovecos de pequeñas partículas sólidas.

El efecto es análogo al que producen las grietas en los sólidos: reducen la resistencia frente a la tensión. Cuando un recoveco lleno de gas queda sometido a un ciclo de presión negativa de una onda sonora, la relajación de la presión hace que el gas se expanda hasta que se libera una pequeña burbuja en la disolución. La mayoría de los líquidos están lo suficientemente contaminados por pequeñas partículas como para que se inicie la cavitación. Con agua del grifo bastaría una presión negativa de algunas atmósferas para formar burbujas.

Una burbuja dentro de un líquido es de por sí inestable. Si la burbuja es grande, ascenderá y explotará en la superficie; si es pequeña, tornará a disolverse en el líquido. Sin embargo, una burbuja irradiada con ultrasonidos absorbe continuamente la energía de los ciclos alternos de compresión y expansión de la onda sonora. En virtud de ello, las burbujas crecen y se contraen, hasta alcanzar cierto equilibrio dinámico entre el vapor del interior de la burbuja y el líquido del exterior. En algunos casos, las ondas ultrasonoras sustentarán una burbuja cuyo tamaño vaya oscilando. Otras veces provocarán el crecimiento de la burbuja.

El crecimiento de las cavidades depende de la intensidad del sonido. Los ultrasonidos de elevada intensidad producen una expansión tan rápida de las cavidades durante el ciclo de presión negativa que, luego, las cavidades no pueden ya encogerse durante el ciclo de presión positiva. Si se sigue este proceso, se asiste a un crecimiento ve-



1. IMPLOSION DE UNA CAVIDAD en un líquido irradiado con ultrasonidos, según ha quedado plasmada en esta microfotografía tomada con una cámara de alta velocidad (*arriba*). La implosión calienta los gases encerrados en el interior de la cavidad hasta una temperatura de 5500 grados Celsius. Al haberse formado la cavidad en las proximidades de una superficie sólida, la implosión es asimétrica, expeliéndose un chorro de líquido a una velocidad aproximada de unos 400 kilómetros por hora. Calor y chorro contribuyen a formar un medio químico singular en el líquido. El diámetro de la cavidad es de unas 150 micras. El dibujo (*derecha*) muestra las fases sucesivas de implosión de la cavidad y formación del chorro. Al principio, la cavidad es esférica, pero se colapsa rápidamente. El chorro se forma en el lado opuesto a la superficie del sólido y se mueve hacia él.

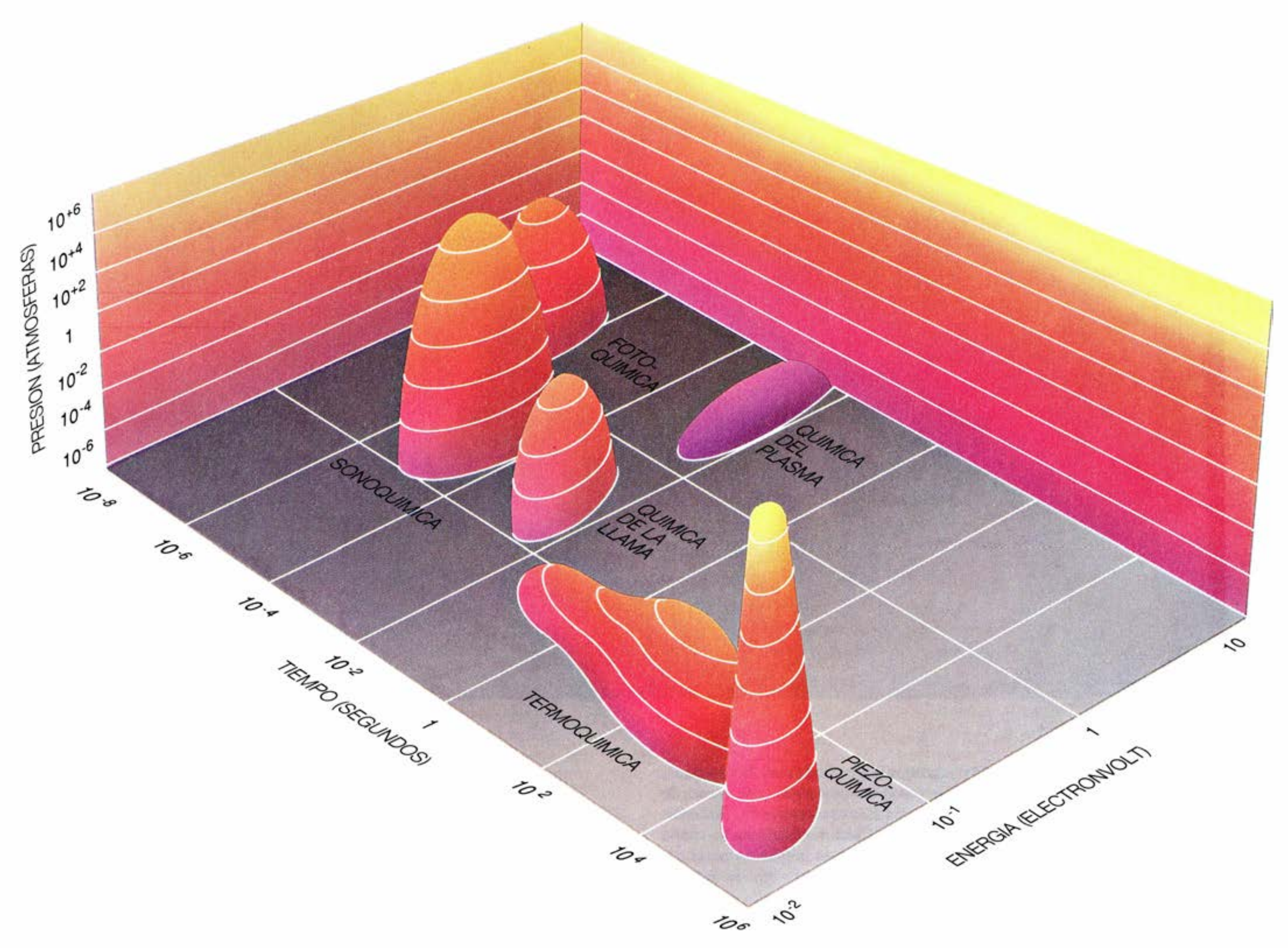
loz de las cavidades en cada ciclo del sonido.

Con ultrasonidos de baja intensidad, el tamaño de las cavidades oscila en fase con los ciclos de compresión y expansión. El área superficial de una cavidad producida por ultrasonidos de baja intensidad es, durante los ciclos de expansión, ligeramente mayor que durante los ciclos de compresión. La cantidad de gas que se difunde hacia dentro o hacia fuera de las cavidades depende de su superficie; por tanto, la difusión hacia el interior de las cavidades durante los ciclos de expansión será ligeramente mayor que la difusión hacia el exterior durante los ciclos de compresión. En consecuencia, para un ciclo completo del sonido las cavidades se expandirán un poco más que lo que se encogen; al cabo de varios ciclos, el tamaño de las cavidades habrá aumentado algo.

En su desarrollo, la cavidad puede adquirir un tamaño crítico para el cual se produzca de forma eficaz la absorción de energía de los ultrasonidos. El tamaño crítico depende de la frecuencia de la onda ultrasonora. Por citar un caso, a 20 kiloherz el diámetro crítico de una cavidad es del orden de 170 micras. Alcanzado este tamaño, la cavidad puede crecer rápidamente en el curso de un solo ciclo de sonido. Una vez que la cavidad ha experimentado este rápido crecimiento, ya no puede absorber la energía de las ondas sonoras con el rendimiento mencionado. Al cesar el suministro de energía, la cavidad se degrada. El líquido irrumpe y la cavidad implosiona.

La implosión de las cavidades constituye un entorno peculiar para las reacciones químicas. Los gases y vapores alojados en el interior de la cavidad se comprimen y desprenden un calor intenso que eleva la temperatura del líquido circundante y crea allí una zona caliente. La temperatura de esta región es altísima. Pese a ello, por ser la zona muy pequeña, el calor se disipa muy rápidamente. Con mis colaboradores de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, he estimado las tasas de calentamiento y enfriamiento durante la cavitación: ¡superan los mil millones de grados centígrados por segundo! Estas cifras son similares a las que se obtendrían si rociáramos con metal fundido una superficie enfriada hasta una temperatura próxima al cero absoluto. Así, pues, el conjunto del líquido se mantiene constantemente a la temperatura ambiente.

Resulta difícil calcular las temperaturas y presiones exactas que se originan durante la implosión de las cavidades, no menos que medirlas experimentalmente. A pesar de ello, es necesario conocer estos datos para evaluar las posibilidades de la sonoquímica. Se han propuesto algunos modelos teóricos que abordan la dinámica de la implosión de cavidades con diferentes niveles de precisión. Precisión que se pierde cuando pretenden describir la dinámica de las cavidades durante las últimas etapas de la implosión. Los modelos más refinados juegan con temperaturas de miles de grados Celsius, presiones de millares de atmósferas y tiempos de calentamiento inferiores al microsegundo.



2. GRACIAS A LA SONOQUIMICA contamos con un rango de energías y de combinaciones de presiones y duraciones impensables con cualquier otra fuente hoy disponible. En la figura superior se ilustran las relaciones entre la energía, la presión y el tiempo para la sonoquímica y otros nuevos campos de la química.

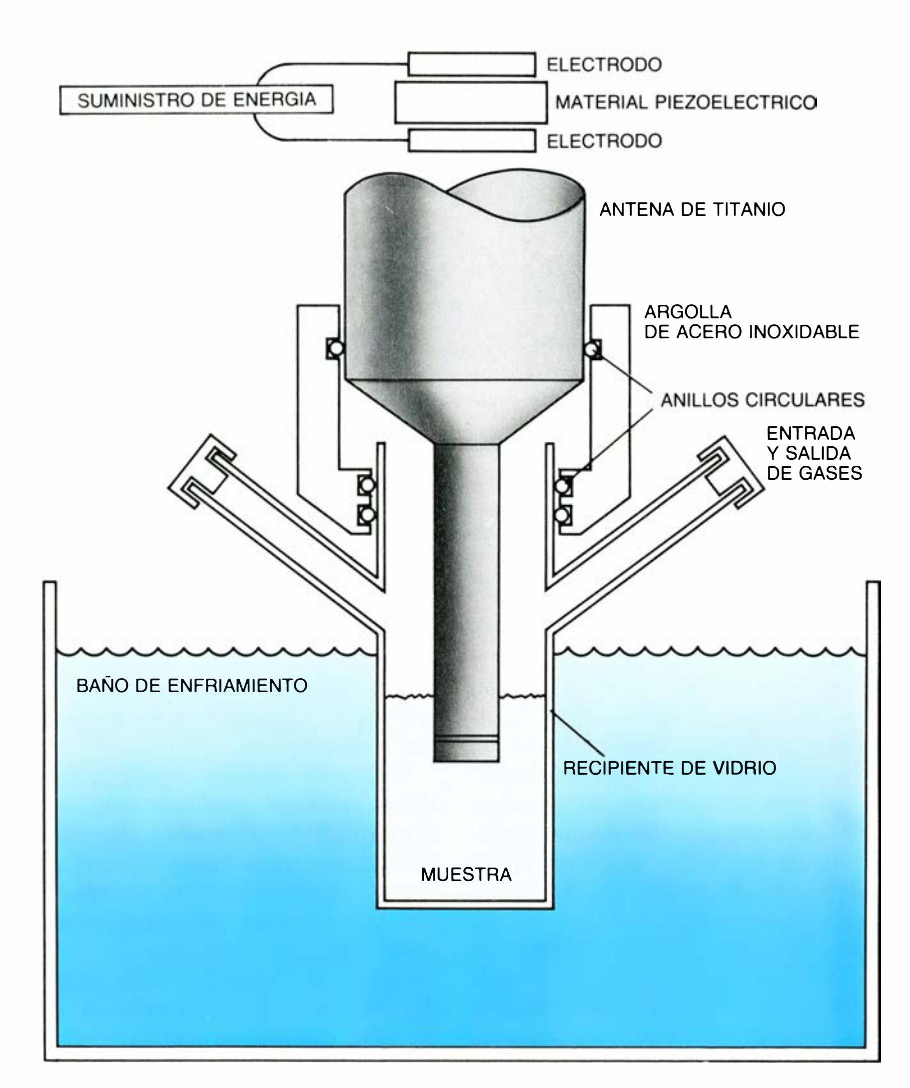
La temperatura de una cavidad durante la implosión no puede medirse con un termómetro físico, porque el calor se disipa con celeridad tal que no puede registrarse. Mis colaboradores y yo hemos encontrado recientemente un método alternativo que permite comprobar experimentalmente los resultados teóricos. Un indicador válido de la temperatura consiste en observar la velocidad a la que transcurren determinadas reacciones químicas. Más exactamente, la temperatura guarda relación con el inverso del logaritmo de la velocidad de reacción, cambiado de signo. Si se miden las velocidades de unas cuantas reacciones en un ambiente con ultrasonidos, se puede calcular la temperatura de la cavidad en implosión.

En el proceso de determinación de las velocidades relativas de una serie de reacciones sonoquímicas, David A. Hammerton descubrió en nuestro laboratorio dos rangos de temperatura asociados con la cavidad en implosión. Los gases alojados desde el comienzo en la cavidad alcanzaban temperaturas de unos 5500 grados centígrados, en tanto que el líquido limítrofe que delimitaba la cavidad alcanzaba una temperatura de 2100 grados. A título de comparación, recordemos que la temperatura de la llama de una lámpara de acetileno es de unos 2400 grados.

La medición experimental de las presiones que se ejercen durante la implosión de una cavidad cuesta más que en el caso de las temperaturas. Ambas magnitudes están, sin embargo, correlacionadas. Sabemos así que la presión máxima es del orden de 500 atmósferas, la mitad de la presión que encontraríamos en el punto más profundo del océano, en el fondo de la fosa de las Marianas.

A pesar de que las condiciones de presión y temperatura locales que aparecen en la implosión de una cavidad son extremas, los químicos detentan ciertos resortes que permiten controlar de forma adecuada las reacciones sonoquímicas. La intensidad de la implosión de una cavidad, y, por tanto, la naturaleza de la reacción, se puede regular mediante la frecuencia acústica, la intensidad acústica, la temperatura ambiente, la presión estática, la elección del líquido y la elección del gas ambiental. La forma en que estos factores condicionan la sonoquímica desafía con frecuencia las intuiciones fundamentales de la química. Vamos a citar tres ejemplos.

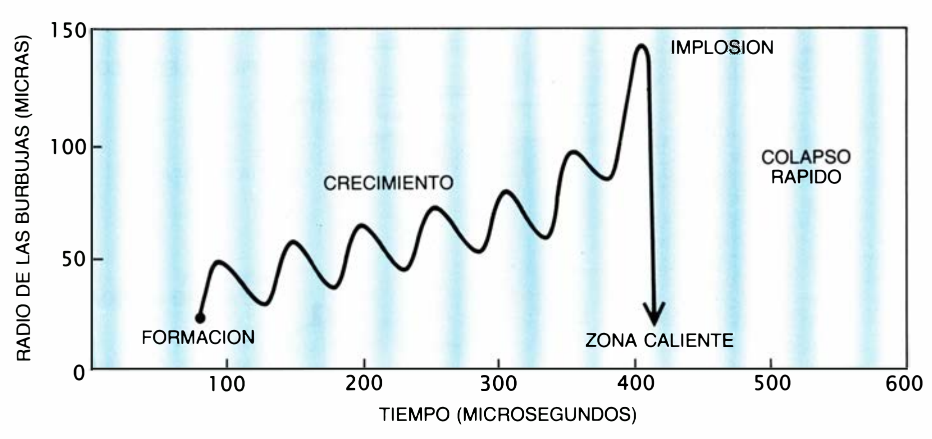
En primer lugar, al contrario de lo que sucede en casi todas las reacciones químicas, la velocidad de la mayoría de las reacciones sonoquímicas disminuye al aumentar la temperatura ambiente, es decir, la temperatura en el exterior de la cavidad. Cuanto mayor sea la temperatura ambiente más vapor habrá dentro de la cavidad. Este vapor adicional amortigua la implosión de la cavidad y rebaja la temperatura de implosión. En consecuencia, las reacciones sonoquímicas disminuyen su ritmo conforme la temperatura ambiente aumenta. En segundo lugar, al contrario de lo que sucede en los procesos químicos gobernados por la luz, las reacciones sonoquímicas no dependen demasiado de la frecuencia. El efecto más importante de la frecuencia radica en cambiar el tamaño crítico de una cavidad antes de la implosión, lo cual no repercute significativamente en el proceso de cavitación. En tercer lugar, al contrario de lo que sucede en muchas reacciones químicas en disoluciones, el gas ambiente que está disuelto en el líquido adquiere un papel importante. Si la cavidad contiene xenón, la temperatura máxima que se alcanzará en la implosión será elevada, puesto que el xenón es mal conductor de calor y retiene el originado en la implosión de la cavidad. En cambio, el helio conduce tan bien el calor que puede llegar incluso a acabar con las reacciones sonoquímicas.



3. ANTENA ULTRASONICA DE INMERSION: es el generador de ultrasonidos más intenso para usos generales. Los ultrasonidos se producen en los líquidos mediante materiales piezoeléctricos o magnetostrictivos, es decir, materiales que se expanden o contraen cuando se colocan en el seno de campos electromagnéticos. Cuando estos materiales se exponen a un campo alterno de frecuencia ultrasónica se genera un ultrasonido. La antena ultrasónica consta de un material cerámico piezoeléctrico unido a una barra de titanio que acaba en punta y sirve para amplificar el sonido. La barra vibra a una frecuencia acústica fija, cifrada en 20 kiloherz (que son 20.000 ciclos por segundo), pero la intensidad resulta ser variable. Dado que las potencias de salida son bastante altas, hay que enfriar la disolución de reacción. (Dibujo de Andrew Christie.)

La dinámica del crecimiento y la implosión de las cavidades dependen en gran medida de las condiciones locales, y en particular de la forma de los materiales, es decir, de si dichos materiales son líquidos, superficies sólidas extensas dentro de un líquido o partículas de sólidos en un líquido. En cada uno de estos casos, los efectos físicos dominantes en la implosión de las cavidades son diferentes y, por tanto, la química también lo es.

La sonoquímica de los líquidos de-



4. CRECIMIENTO DE UNA BURBUJA Y SU IMPLOSION en un líquido irradiado con ultrasonidos; constituye el fenómeno físico responsable de la sonoquímica. Las ondas ultrasónicas intensas originan elevadas tensiones alternas en el interior de un líquido, lo que resulta en regiones de presión positiva (*oscuro*) y presión negativa (*claro*). Durante las fases de presión negativa puede aparecer e ir creciendo una cavidad. Cuando ésta adquiere cierto tamaño crítico, implosiona y genera un calor intenso y una presión muy elevada.

pende fundamentalmente de los efectos físicos del rápido calentamiento y enfriamiento causado por la implosión de las cavidades. En este sentido, cuando Peter Riesz y sus colaboradores del Instituto Nacional del Cáncer irradiaron agua con ultrasonidos, encontraron que el calor desprendido con la implosión de las cavidades descomponía el agua (H_2O) en átomos de hidrógeno extremadamente reactivo (H^+) y en radicales hidroxilo (OH^-). Durante la fase de enfriamiento rápido, los átomos de hidrógeno y los radicales hidroxilo se recombinan para formar peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidrógeno molecular (H_2). Si se añaden otros compuestos al agua irradiada con ultrasonidos, se puede producir una amplia gama de reacciones secundarias. Los compuestos orgánicos resultan fuertemente degradados en este medio y los compuestos inorgánicos se pueden oxidar o reducir.

Con otros líquidos orgánicos se obtienen también reacciones muy interesantes cuando se irradian con ultrasonidos. Así sucede con los alcanos, principales componentes del petróleo crudo, que pueden descomponerse en otros fragmentos más pequeños y útiles (proceso de "cracking") tales como la gasolina. Para provocar dicho proceso, se suele calentar la mezcla original a temperaturas por encima de los 500 grados centígrados. Sin embargo, la irradiación de los alcanos con ultrasonidos permite llevarlo a cabo a temperatura ambiente y produce acetileno, que no se obtiene con el mero calentamiento.

Tal vez el fenómeno químico más raro asociado con los ultrasonidos es su capacidad de producir llamas microscópicas en líquidos fríos mediante un proceso conocido con el nombre de sonoluminiscencia. Cuando la implosión de una cavidad genera una región caliente en varios líquidos, las moléculas pueden ser excitadas hacia estados de elevada energía. Cuando estas moléculas retornan a su estado fundamental, emiten luz visible. Edward B. Flint descubrió en nuestro laboratorio, en 1987, que los hidrocarburos irradiados con ultrasonidos exhibían un comportamiento sorprendente: la luz emitida presentaba un color similar al de la llama de un horno de gas.

Se han aprovechado los efectos de los ultrasonidos sobre los líquidos para realzar la química de los compuestos en disolución. Los compuestos que contienen enlaces de metal-carbono, los organometálicos, resultan particularmente ilustrativos. Esta amplia gama de productos químicos reviste especial interés en la fabricación de plásticos, en la producción de elementos de microelectrónica y en la síntesis de productos farmacéuticos, herbicidas y pesticidas. En 1981, Paul F. Schubert y el autor investigaron los efectos de los ultrasonidos sobre algunos compuestos organometálicos, concretamente en el pentacarbonilo de hierro, $Fe(CO)_5$. La comparación entre los resultados obtenidos en esta experiencia con los efectos producidos por la luz y el calor sobre $Fe(CO)_5$ ilustra perfectamente las posibilidades que presenta la química con ultrasonidos [*véase la figura 6*]. Cuando el $Fe(CO)_5$ se calienta, se descompone en monóxido de carbono (CO) y en un polvo de hierro muy fino, que arde al contacto con el aire. Cuando el $Fe(CO)_5$ se expone a la luz ultravioleta se descompone en $Fe(CO)_4$ y fragmentos de CO libres. El $Fe(CO)_4$ puede recombinarse y formar $Fe_2(CO)_9$. La implosión de las cavidades arroja diferentes resultados. Este proceso suministra una cantidad de calor suficiente como para disociar varias moléculas de CO, pero el enfriamiento que tiene lugar es tan rápido que la reacción se interrumpe antes de terminar la descomposición. El resultado es que el $Fe(CO)_5$ expuesto a ultrasonidos produce un compuesto poco usual, el $Fe_3(CO)_{12}$.

La sonoquímica de dos líquidos inmiscibles (lo son el aceite y el agua) parte de la capacidad de los ultrasoni-

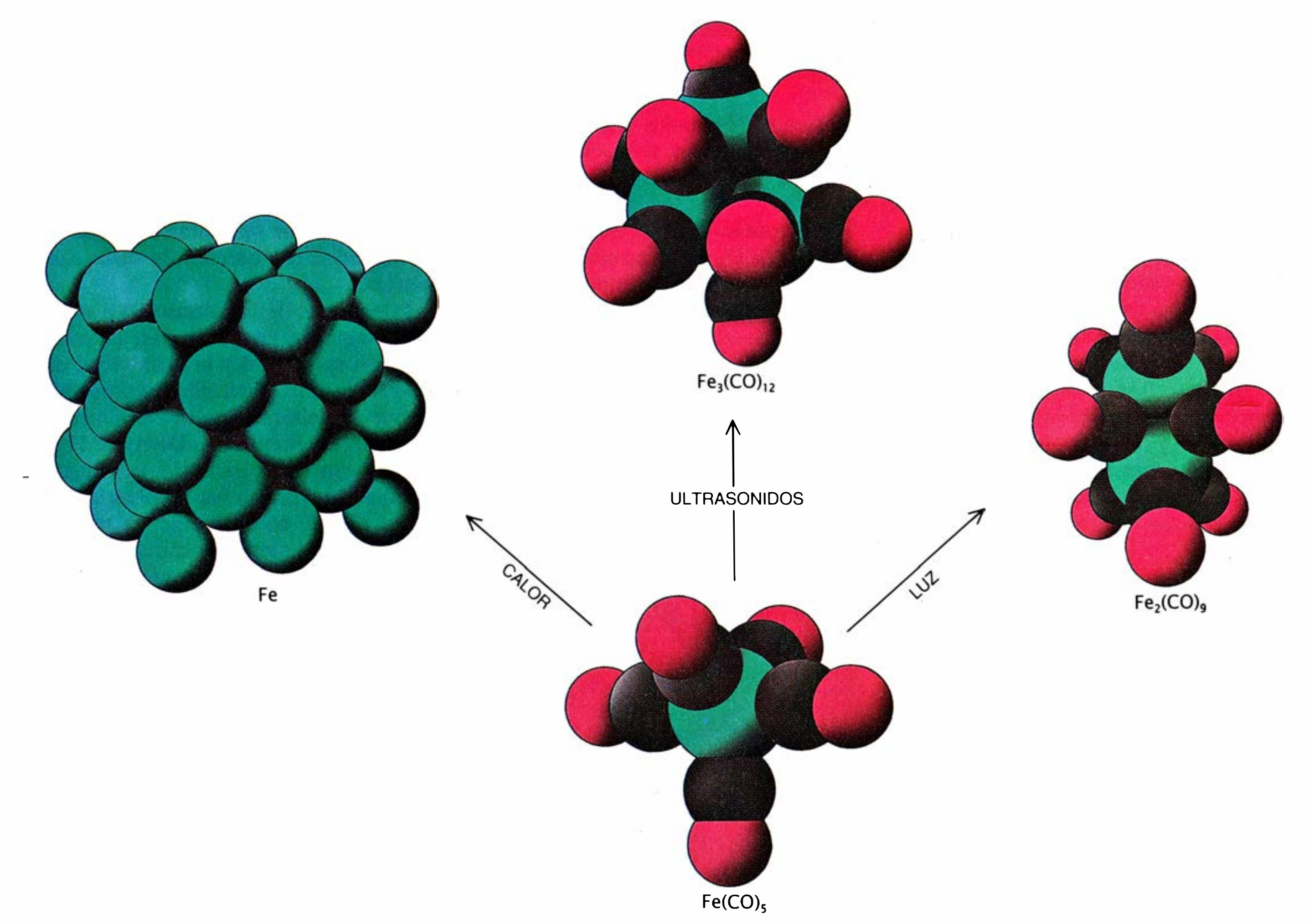
5. LA LUZ que emiten los hidrocarburos fríos en fase líquida expuestos a ultrasonidos se parece a una llama de gas. Los físicos llaman a ese fenómeno sonoluminiscencia. Los gráficos muestran el espectro producido por la sonoluminiscencia del dodecano $C_{12}H_{24}$ (*arriba*) y la combustión del metano CH_4 (*abajo*). Las semejanzas entre estos espectros obedecen a la formación y emisión de carbono diatómico en ambos casos.

dos para emulsionar líquidos, de tal forma que en cada líquido se dispersan gotitas microscópicas del otro. Las compresiones y expansiones ultrasónicas tensan las superficies de los líquidos, venciendo las fuerzas de cohesión que mantienen unidas las moléculas que constituyen una gota de gran tamaño. La gota se divide en otras menores y los líquidos terminan por emulsionarse.

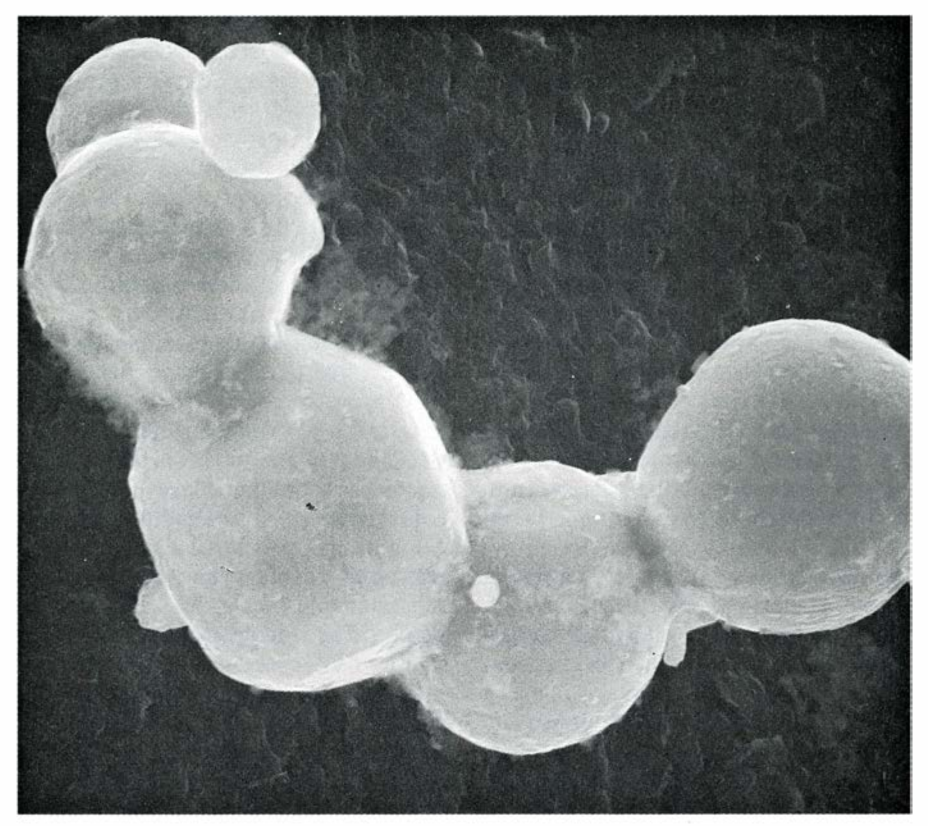
El proceso de emulsión acelera las reacciones químicas entre líquidos inmiscibles al aumentar notablemente sus superficies de contacto. La existencia de una amplia superficie de contacto facilita el tránsito de moléculas de uno a otro líquido, un efecto que puede acelerar la velocidad de las correspondientes reacciones. Tal como pusieron de manifiesto las investigaciones de Albert J. Fry, de la Universidad Wesleyan, la emulsión de mercurio en otros líquidos resulta muy interesante desde el punto de vista químico; obtuvo diversas reacciones entre el mercurio y ciertos compuestos orgánicos de bromo como fase intermedia para la formación de nuevos enlaces carbono-carbono. Se trata de reacciones decisivas en la síntesis de compuestos orgánicos complejos.

La sonoquímica de las superficies sólidas dentro de líquidos depende del cambio en la dinámica de la implosión de las cavidades. Cuando la cavitación de un líquido se produce en las proximidades de una superficie sólida extensa, las implosiones de las cavidades difieren sustancialmente de las implosiones esféricas simétricas que se observan en los sistemas constituidos sólo por líquidos. La presencia de la superficie distorsiona la presión del campo ultrasónico, de forma tal que la implosión de una cavidad en las proximidades de una superficie es notablemente asimétrica. Este hecho da lugar a la formación de un chorro de líquido en dirección a la superficie en cuestión, que se mueve a velocidades próximas a los 400 kilómetros por hora. Junto con las ondas de choque originadas en la implosión de la cavidad, el chorro erosiona la superficie del sólido, desprende de los revestimientos no reactivos y desmenuza las partículas quebradizas. Las elevadas temperaturas y presiones que van asociadas a la implosión de cavidades en la proximidad de una superficie favorecen las reacciones. Todos estos procesos potencian la reactividad química de las superficies sólidas, un factor de gran importancia en la síntesis de ciertos medicamentos, polímeros y productos químicos.

La sonoquímica de las superficies sólidas dentro de líquidos se ilustra perfectamente en las reacciones de los metales activos, tales como litio, magnesio, cinc y aluminio. La irradiación ultrasónica sobre las mezclas reactivas constituidas por estos metales proporciona un mejor control a temperaturas más bajas y produce unos rendimientos relativamente mayores. Pierre Renaud, de la Universidad de París, examinó estas reacciones. Más recientemente, Jean-Louis Luche, de la Universidad de Grenoble, y Philip Boudjouk, de la Universidad estatal de North Dakota, han popularizado el empleo de un baño limpiador ultrasó-



6. QUIMICA DE LOS ULTRASONIDOS y sus notables diferencias de la química de la luz y el calor. Las reacciones del pentacarbonilo de hierro $Fe(CO)_5$, constituido por un átomo de hierro (*color verde*) ligado a cinco unidades de monóxido de carbono (*color marrón obscuro y rojo*), ponen de manifiesto estas diferencias. El calor descompone la molécula de pentacarbonilo de hierro en hierro puro y monóxido de carbono. La luz proporciona dos átomos de hierro ligados a 9 unidades de monóxido de carbono. Los ultrasonidos producen un agregado de 3 átomos de hierro, ligados a 12 unidades de monóxido de carbono.



7. COLISIONES ENTRE LAS PARTICULAS por efecto de las ondas de choque originadas en la implosión de las cavidades. Esos choques causan la aglomeración de dichas partículas. Las colisiones entre las partículas de cinc (aumentadas 13.000 diámetros en esta figura, obtenida por Dominick J. Casadonte y Frank J. Scheltens, en Urbana-Champaign) fueron tan violentas que las partículas metálicas se fundieron en el impacto.

nico para acelerar las reacciones de los metales activos.

La química de estos metales es muy difícil de controlar. Bastan trazas de agua, oxígeno o nitrógeno para reaccionar en la superficie de dichos metales formando películas protectoras. Pero si se busca el aumento de la reactividad de las superficies protegidas calentándolas directamente, se pueden producir explosiones indeseadas. Los ultrasonidos mantienen limpias dichas superficies y permiten que las reacciones transcurran sin sobresaltos en un ambiente de temperatura más baja. Este procedimiento permite obtener excelentes resultados y una mayor seguridad en ciertas aplicaciones industriales a gran escala de muchos metales reactivos.

Las condiciones extremas asociadas a la cavitación en la proximidad de las superficies se pueden utilizar también para inducir la reactividad de metales "no reactivos". En este contexto, Robert E. Johnson ha estudiado en nuestro laboratorio las reacciones entre el monóxido de carbono y el molibdeno y el tántalo, así como otros metales similares. Las técnicas convencionales exigen presiones que van de 100 a 300 atmósferas y temperaturas entre 200 y 300 grados centígrados para formar carbonilos metálicos. Sin embargo, el empleo de ultrasonidos permite obtener carbonilos metálicos a presión y temperatura ambiente.

Además de todos los efectos que hasta aquí se han descrito, la implosión de una cavidad emite ondas de choque a través del líquido. La sonoquímica de partículas sólidas en líquidos depende en gran medida de estas ondas de choque; las partículas de polvo son arrastradas, provocándose colisiones entre ellas a velocidades superiores a los 500 kilómetros por hora. Con mis colaboradores he demostrado que estas colisiones son tan violentas en los polvos metálicos que, en los puntos de impacto, tiene lugar un proceso de fusión localizada. Esta fusión aumenta la reactividad del metal, debido a que elimina los revestimientos de óxidos metálicos. (Estos revestimientos protectores de óxidos metálicos se encuentran en la mayoría de los metales y son los responsables de las pátinas en las cañerías de cobre o en las esculturas de bronce.)

Dado que los ultrasonidos aumentan la reactividad de los metales pulverizados, los hace también mejores catalizadores. Muchas reacciones requieren un catalizador para que su velocidad permita una utilización práctica o incluso apreciar la misma reacción. Los catalizadores no se consumen en las reacciones, sino que se limitan a aumentar la velocidad de reacción de otras sustancias.

Los efectos de los ultrasonidos en la morfología de las partículas, la composición superficial y la reactividad de los catalizadores han sido investigados en nuestro laboratorio por Dominick J. Casadonte y Stephen J. Doktycz. Han descubierto que al irradiar con ultrasonidos catalizadores pulverizados como níquel, cobre o cinc, la morfología de sus superficies sufre drásticos cambios. Cada superficie quedaba suavizada y las partículas se agrupaban en agregaciones mayores. Un experimento llevado a cabo para determinar la composición de la superficie del níquel puso de manifiesto que su revestimiento de óxido quedaba eliminado, mejorándose así la reactividad del níquel en polvo. La irradiación con ultrasonidos multiplicaba la efectividad del níquel en polvo como catalizador por más de 100.000. En estas condiciones, el polvo de níquel es tan reactivo como ciertos catalizadores en uso, con la ventaja de que es más barato y no inflamable.

La utilización de ultrasonidos acarrea grandes ventajas en casi todos los





8. SUPERFICIES METALICAS alteradas físicamente con la ayuda de los ultrasonidos. Antes de que esta muestra de níquel en polvo fuera irradiada con ultrasonidos (*izquierda*) su superficie estaba revestida por una capa cristalina no reactiva. Tras la irradiación (*derecha*), el revestimiento había desaparecido, dejando el níquel al descubierto y potenciando enormemente su reactividad. Sin ese revestimiento el níquel en polvo se torna un excelente catalizador de reacciones químicas. El aumento de las fotografías es de 100 diámetros.

casos en que deben reaccionar un líquido y un sólido. Por otra parte, como los ultrasonidos pueden atravesar grandes volúmenes de líquidos, su utilización en la industria no presenta problemas. Por estos motivos, es de prever que las futuras aplicaciones de los ultrasonidos en reacciones químicas serán muy amplias. El uso de ultrasonidos en la síntesis de productos farmacéuticos mejorará los rendimientos obtenidos con métodos tradicionales.

Sin embargo, es muy posible que los mayores avances en la sonoquímica vayan en la línea de la fabricación de nuevos materiales dotados de propiedades singulares. Así, las extraordinarias temperaturas y presiones que se alcanzan en la cavitación pueden conducir a la síntesis de materiales refractarios (el carburo de silicio y el de wolframio o incluso el diamante). Los sólidos refractarios, estables a altas temperaturas, gozan de un enorme vigor estructural. Estos materiales tienen una gran importancia como abrasivos industriales y en la fabricación de piezas de herramientas reforzadas.

El enfriamiento extraordinariamente rápido que tiene lugar tras la implosión de las cavidades se puede utilizar en la creación de vidrios metálicos. Estos metales amorfos oponen una gran resistencia a la corrosión y se caracterizan por su extrema dureza.

Aunque las aplicaciones químicas de los ultrasonidos se encuentran todavía en sus etapas iniciales de desarrollo, la previsión para los próximos años es prometedora. El empleo de ultrasonidos en las reacciones de laboratorio se está generalizando y es probable que esa técnica se extienda luego a las reacciones de valor comercial a escalas industriales. Los recientes avances de nuestro conocimiento sobre la naturaleza de la cavitación y los efectos químicos de los ultrasonidos constituyen los cimientos sobre los que descansa la nueva técnica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ULTRASOUND IN SYNTHESIS. Kenneth S. Suslick en *Modern Synthetic Methods*, vol. 4, págs. 1-60; 1986.

SYNTHESIS WITH ULTRASONIC WAVES. Philip Boudjouk en *Journal of Chemical Education*, vol. 63, n.º 5, págs. 427-429; mayo de 1986.

SONOLUMINESCENCE FROM NON-AQUEOUS LIQUIDS. Kenneth S. Suslick y Edward B. Flint en *Nature*, vol. 330, n.º 6148, págs. 553-555; 10 de diciembre de 1987.

ULTRASOUND: ITS CHEMICAL, PHYSICAL AND BIOLOGICAL EFFECTS. Editado por Kenneth S. Suslick. VCH Publishers, Inc., 1988.

Dientes y prehistoria en Asia y América

Pequeños rasgos estructurales de la dentición humana han permitido reconstruir las grandes migraciones prehistóricas que poblaron el Nuevo Mundo, así como el este de Asia y la cuenca del Pacífico

Christy G. Turner II

Cuando hablamos de testimonios dejados por las grandes migraciones de la prehistoria humana, nos vienen a la mente objetos fabricados por el hombre o vestigios de su actividad: cuchillos líticos, restos de casas enmaderadas, fragmentos de cerámica, etcétera. Pero hay otros datos, menos llamativos, que aportan tanta o más información que aquéllos; los dientes, por ejemplo. La estricta morfología de la dentición humana es el resultado de patrones de herencia genética que permanecen de generación en generación en el seno de una población determinada. De ese modo, las diferencias entre grupos pueden utilizarse para descifrar de qué forma están o estuvieron relacionados; algo así como realizar un árbol genealógico. Durante tres décadas mi investigación se ha centrado en el recurso de los caracteres de la dentición para desentrañar el desarrollo de las migraciones prehistóricas que poblaron Asia, cuenca del Pacífico y continente americano. Hemos creado un perfil razonable del fenómeno.

Dicha imagen se funda en un doble concepto que he llamado sondadontia y sinodontia. Cada uno de ellos representa un grupo diferente de rasgos dentales y corresponde a las dos grandes ramas de un sistema de población. Los sondadontos pueblan hoy el sureste de Asia, Indonesia y Polinesia. Los sinodontos ocupan China, Japón y Siberia, así como todo el Nuevo Mundo. El origen de este gran entramado de la humanidad parece haber tenido lugar en el sureste asiático. Desde allí, los pueblos que más tarde se transformarían en sinodontos se extendieron a China, luego a Siberia y, finalmente, a través del puente de Bering, a Norteamérica. Gracias a la estabilidad del modelo dental, podemos deshilar ese entramado en sentido inverso, desde los paleoindios que alcanzaron Chile hasta sus orígenes en el sureste asiático.

A raíz de las exploraciones europeas en el Pacífico, este de Asia y América, de 1500 a 1750, se propusieron varias hipótesis para explicar los orígenes y relaciones entre los pueblos que habitaban esas vastas regiones. Algunas de esas hipótesis eran razonables; otras, absurdas. Años atrás se suponía que los polinesios procedían de Egipto. Durante mucho tiempo se creyó que los ainu del norte de Japón constituían un extraño tipo de caucasoides. Todavía hay quien afirma que los negritos de Filipinas y de las islas de Andaman tienen raíces africanas. Se han propuesto muchos lugares de origen para los indios americanos y esquimales: islas sumergidas en el Pacífico, la Antártida, el Mediterráneo e incluso Europa.

Buena parte de esa disparidad y la naturaleza especulativa y fabulosa de esas hipótesis se explican por la variopinta diversidad de poblaciones que ocupan esta vasta región, casi la mitad de la superficie terrestre. Abarca islas del Trópico, exuberantes selvas tropicales, cálidas y polvorientas estepas, la helada tundra ártica, bosques boreales, desiertos, costas oceánicas, montañas y praderas. E incardinadas en esos ambientes tan diversos, culturas desconcertantes que arraigaron entre las poblaciones del Pacífico, América y Asia.

A pesar de lo cual, no todas las dificultades nacen de la complejidad de las poblaciones humanas. Algunas obedecen al tipo de datos seleccionados al pretender esclarecer las relaciones entre grupos. Unos investigadores se basaron en habilidades adquiridas, así las técnicas de talla, para establecer un árbol genealógico. Sin embargo, la influencia medioambiental es mucho mayor en estas habilidades adquiridas que en los caracteres heredados. Elementos culturales aislados, pensemos en anzuelos, casas o tocados, pueden converger en una sorprendente semejanza estilística, sin tener ningún origen común.

Aun cuando los caracteres heredados se seleccionen, el problema no queda automáticamente resuelto. El color de los ojos y otros rasgos que dependen de la herencia de un único gen pueden cambiar radicalmente en su frecuencia durante el curso de un movimiento migratorio, en especial si ese carácter es poco frecuente en la población original. Si un rasgo tiene una frecuencia de un 10 por ciento en la población fuente y el grupo que va a colonizar un nuevo territorio es pequeño, resulta muy posible que el carácter desaparezca por completo entre los colonizadores. Verbigracia, el grupo sanguíneo B, abundante en el noreste de Asia, ha desaparecido entre los aborígenes americanos, que descienden de habitantes prehistóricos del noreste asiático.

Por tanto, las mejores variables para reconstruir la historia poblacional son las que no dependen de un solo gen, sino de muchos y que apenas se modifiquen en respuesta a cambios me-

CHRISTY G. TURNER II enseña antropología en la Universidad estatal de Arizona. La antropología dental ha sido el centro de sus investigaciones desde que defendió su tesis doctoral en 1967, sobre la dentición de los pueblos árticos americanos. Su actividad investigadora en 16 países ha sido subvencionada por la National Geographic Society, Fundación para la Ciencia, la Academia Nacional norteamericana de Ciencias, la Academia de Ciencias de la Unión Soviética e IREX.

dioambientales. Por razones prácticas importa que los rasgos que se estudien sean fáciles de examinar, que el análisis sea poco costoso y que puedan compararse directamente en poblaciones actuales con las del pasado. Ciertos elementos del esqueleto, en particular los dientes, cumplen estos requisitos. Eso explica que la "antropología dental" se haya asentado como disciplina en sus cincuenta años de existencia, desde los estudios pioneros de Ales Hrdlicka, de la Institución Smithsoniana, y otros investigadores.

¿Qué peculiaridades de la dentición facultan a los antropólogos para distinguir entre las poblaciones humanas? Nuestros dientes tienen cinco caracteres básicos. Primero, la corona, armada con un duro esmalte para cortar y moler la comida; segundo, las largas raíces que anclan a cada diente en el hueso de soporte; tercero, la división de los dientes en diferentes tipos: incisivos, caninos, premolares y molares; cuarto, el número de dientes −32−, a cada uno de los cuales (excepto los molares) precede uno de los 22 dientes deciduos infantiles.

Esas características generales las encontramos en todos los seres humanos modernos, prueba de una sorprendente estabilidad de herencia poligénica. Lo que más varía en el interior de un mismo grupo humano, y entre los principales grupos, son las frecuencias de los rasgos secundarios. Por tales entendemos el número de cúspides (protuberancias redondeadas sobre la superficie de masticación) de los molares, el número de raíces, pequeños pliegues y surcos en el esmalte y otros caracteres anatómicos de pequeñas dimensiones. Si bien las frecuencias de estos rasgos secundarios difieren bastante de un grupo humano a otro, son relativamente estables en el tiempo dentro de un mismo grupo −incluso en grupos restringidos−, como lo corroboran numerosos estudios de varios investigadores.

He utilizado estos rasgos secundarios para desarrollar una hipótesis evolutiva y unificadora de la variación biocultural y lingüística de los pueblos de la cuenca y áreas marginales del Pacífico. El núcleo conceptual de la misma se me ocurrió de repente hace unos quince años, mientras tomaba notas de ciertas observaciones dentales, junto con Kazuro Hanihara, de la Universidad de Tokyo. De pronto vi que el mosaico va-



1. EL TERCER MOLAR EN FORMA DE ESTACA, como el que se muestra a la izquierda en la fotografía, obtenida por el autor del artículo, es común en aleutianos y esquimales. Nos hallamos ante una de las características que ha permitido al autor dividir los pueblos nativos del este de Asia y del Nuevo Mundo en dos grandes grupos: sondadontos y sinodontos. Los aleutianos y esquimales (con los pueblos aborígenes americanos) se encuentran entre los sinodontos.

riopinto que presentaban los pueblos del Pacífico respondía a sólo dos formas principales; sondadontia y sinodontia. Entre los sondadontos aparecen los pueblos aborígenes del sureste asiático, incluidos los tailandeses, birmanos y pueblos insulares de Andaman, los primeros camboyanos y laosianos, malasios, filipinos, aborígenes de Taiwan y Borneo y otros pueblos indonesios.

Por su parte, la sinodontia es un modelo dental asiático ligeramente diferente; se descubre entre las poblaciones más septentrionales y árticas del este de Asia: chinos, mongoles, buriatos, japoneses modernos, siberianos del este y otros, incluidos todos lo habitantes primitivos de las dos Américas. El límite entre estos dos modelos principales parece situarse en el sureste de China. Desde que llegué a ese doble criterio, he analizado miles de muestras de dientes. Lo he sometido a varios análisis estadísticos; su validez no ha decaído.

De la treintena de rasgos secundarios más conocidos y comúnmente estudiados, las frecuencias de ocho ofrecen una significación estadística válida para la distinción entre sondadontia y sinodontia. Pertenecen a la mandíbula superior los siguientes: incisivos en forma de pala e incisivos en forma de doble pala, número de raíces del primer premolar, extensión del esmalte del primer molar y reducción del tercer molar; a la mandíbula inferior: una prolongación distal de esmalte del metacónido (“deflecting wrinkle”) en el primer molar, número de raíces del primer molar y número de cúspides del segundo molar. (Esos detalles se aprecian mejor a través de las fotografías que acompañan a este artículo.)

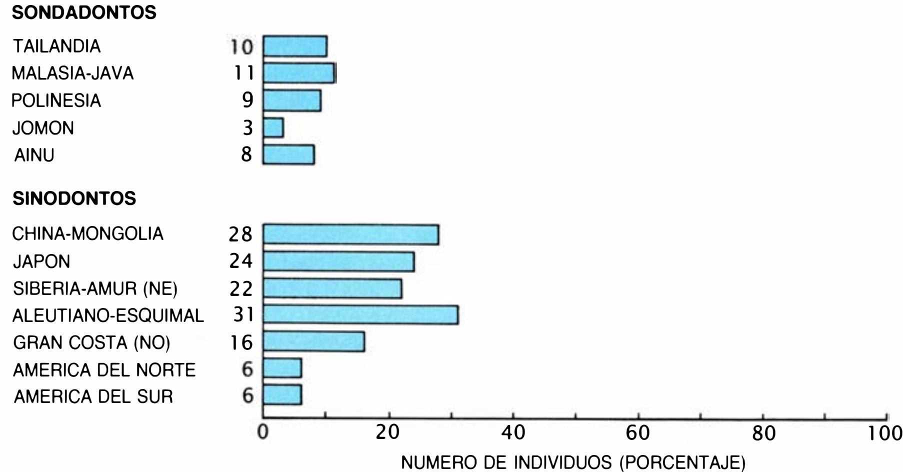
Todas las poblaciones que constituyen los sondadontos o sinodontos suelen adscribirse a la raza mongoloide. Pero es obvio que existen discrepancias entre estos grupos que revisten un notable interés para la interpretación biohistórica. Estas diferencias aparecen como variaciones en la frecuencia de determinados rasgos secundarios de la dentición. Tomemos, por ejemplo, un incisivo superior en forma de pala; la presencia de una cresta marginal adicional en la corona es lo que da esa apariencia al incisivo [*véase la figura 3*].

Cuando se comparan los distintos grupos, se observan palmarias diferencias en la frecuencia de incisivos en pala. Los pueblos del sureste asiático, tailandeses y malayo-javaneses, presentan frecuencias de dientes en pala significativamente inferiores a las de los pueblos del nordeste de Asia o los nativos americanos. Los polinesios, los jomon (antiguos habitantes de Japón) y los ainu (modernos habitantes de algunas zonas del norte de Japón, cuyo origen difiere del de la mayoría de los modernos japoneses) presentan también frecuencias bajas, en contraposición a lo que ocurre con la gran mayoría de la población japonesa.

La frecuencia de incisivos en pala define, por tanto, dos claros grupos de población: sondadontos y sinodontos. Tras varios análisis estadísticos en éstas y otras muestras de poblaciones, aparece siempre el mismo resultado: los polinesios, los jomon y los ainu se agrupan con los del sureste asiático como sondadontos, mientras que los japoneses coinciden siempre con los del nordeste asiático y las poblaciones nativas americanas, como sinodontos.

Estas relaciones entre grupos definidas por los rasgos dentales revelan una fascinante historia evolutiva que se inició hace algo más de 50.000 años en el sureste de Asia. Los hombres modernos de esta región de anatomía más antigua vinieron probablemente de Africa, aunque pudieron evolucionar





2. APARECEN TRES RAICES en el primer molar inferior, cuando una raíz adicional se desarrolla acompañando a las otras dos habituales. A la izquierda puede verse un diente trirradiculado. Tal y como indica el gráfico, los dientes trirradiculados son más frecuentes entre los sinodontos que entre los sondadontos.

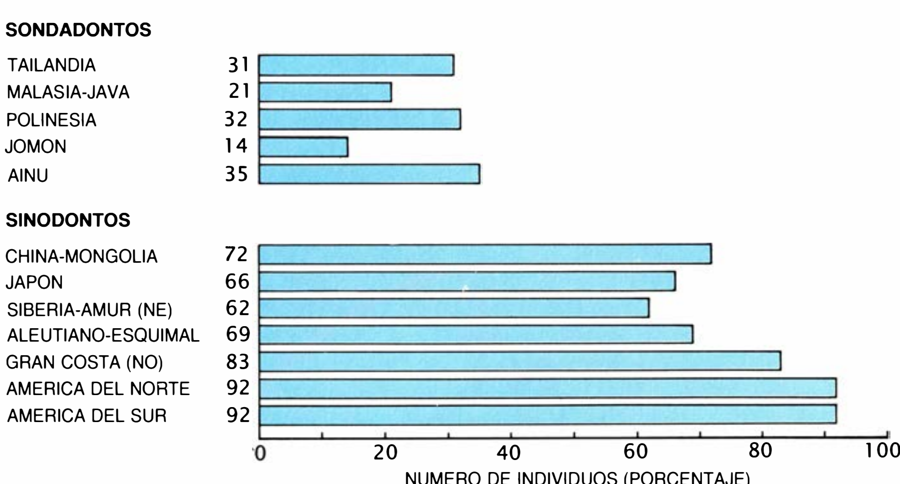
luego de forma independiente. Cualquiera que sean sus orígenes exactos, compartieron un modelo dental con otros hombres modernos primitivos. Los restos humanos más antiguos conocidos, representantes de este modelo en el sureste asiático, son el de Tabón, de 20.000 años de antigüedad encontrado en Filipinas, y el cráneo de la cueva Niah en Sarawak, datado en 40.000 años. Ambos especímenes son más antiguos que cualquier otro hallazgo de hombre moderno que se haya encontrado en el noreste de Asia.

Aparte del modelo primitivo generalizado, que hallamos en la dentición de los ejemplares de Tabón y de la cueva Niah, se desarrolló allí la sondadontia. Guarda ésta una íntima relación con el modelo primitivo generalizado; del que retiene su característica corona y raíz, con ciertas simplificaciones de la corona. El centro del área donde se desarrolló la sondadontia se encuentra en la plataforma de Sonda, una llanura continental que sirvió de puente entre las áreas insulares y el continente suroriental asiático. En el momento en que se formó el modelo sondadonto, el nivel del mar estaba 100 metros por debajo del actual. Hacia el final del Pleistoceno superior, el nivel empezó a subir y hace unos 12.000 años la plataforma de Sonda quedó inundada, mientras que el archipiélago de Indonesia, Japón, islas del sureste asiático y otras áreas permanecieron emergidas.

Cuando el nivel del mar ascendió, los jomon, que ya eran sondadontos, quedaron aislados en Japón, lugar al que habían emigrado a través de la costa de lo que ahora es plataforma continental inundada del este asiático. Se puede concluir, por tanto, que la sondadontia tiene al menos 12.000 años de antigüedad. De hecho, el modelo puede ser bastante más antiguo. El modelo dental de los esqueletos de Minatogawa, de hace 17.000 años, encontrados en la isla de Okinawa y estudiados por Hanihara y Hisashi Suzuki, de la Universidad de Tokyo, es casi con toda probabilidad sondadonto. La única razón de duda estriba en el tamaño exiguo de la muestra. Los actuales ainu tienen un extraordinario parecido con los jomon, por lo que la secuencia de descendientes podría iniciarse en los pueblos del sureste asiático, para continuar en Minatogawa y luego en Jomon, hasta llegar a originar a los actuales ainu.

Los orígenes de la sondadontia se tornarán algo más claros si nos fijamos





3. FORMA EN PALA, característica de la superficie interna de los incisivos superiores; débese a la presencia de crestas marginales muy desarrolladas que dan a la corona tal apariencia. Como nos manifiestan los gráficos inferiores, las formas en pala son mucho más frecuentes entre los sinodontos que entre los sondadontos.

en los nativos de Australia. Los antepasados de los aborígenes australianos pudieron haber permanecido en el sureste asiático sólo brevemente, antes de su expansión a través de Indonesia, hasta llegar a Australia. Los primeros grupos que arribaron a la costa australiana llegaron en balsas hace unos 30.000 años. Estos inmigrantes no presentaban el modelo sondadonto, sino el modelo primitivo generalizado evolucionado. Por tanto, parece muy posible que la sondadontia se desarrollara hace de 30.000 a 17.000 años (tiempo en que ya se observa ese fenómeno en los restos de Minatogawa de Okinawa).

¿Cómo se propagó el modelo sondadonto y qué cambios sufrió desde su aparición? Mientras que algunos sondadontos (como los de Jomon) emigraron hacia el norte, siguiendo la costa continental, otros se encaminaron también al norte, pero hacia el interior. La expansión interior del continente llevó a la formación de poblaciones en el noreste asiático, entre las que evolucionó el modelo sinodonto. La sinodontia presenta especialización e intensificación de varios caracteres de las raíces y de las coronas de los dientes. Estos cambios pudieron haber sido consecuencias microevolutivas de la adaptación a una vida en áreas más frías y sujetas a mayores tensiones como es la de

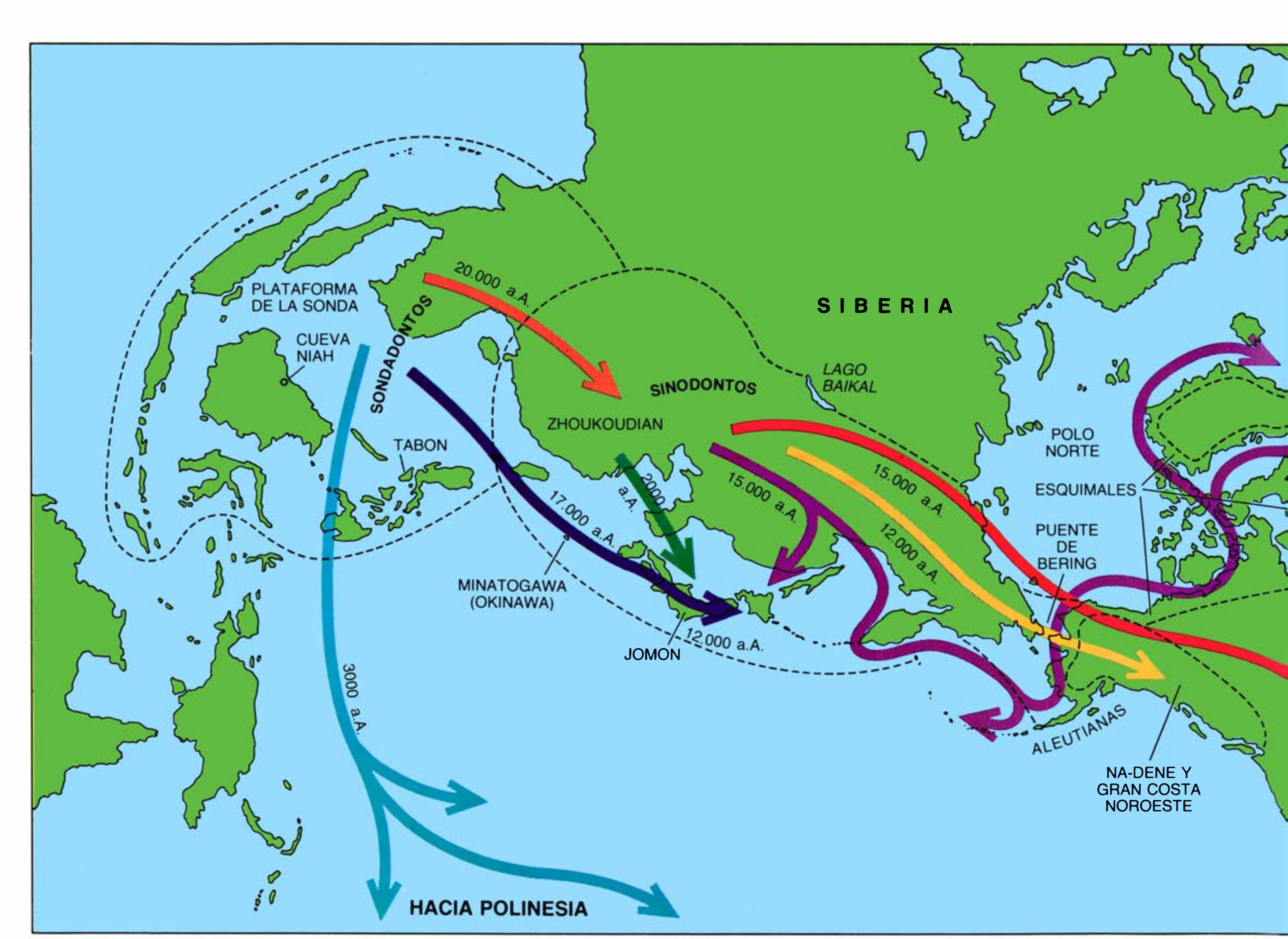
las regiones del norte. Sin embargo, resulta más verosímil que esto responda a un mero cambio genético aleatorio, que se originaría en pequeños núcleos aislados de pescadores y cazadores del Pleistoceno superior en el noreste asiático.

Los que ya poseían el modelo sondadonto se dispersaron por China y Mongolia, hace unos 20.000 años. Allí se desarrolló rápidamente la sinodontia, tal es mi sospecha. Este nuevo modelo se hace manifiesto en los cráneos encontrados en la Cueva Superior de Zhoukoudian, al norte de China, un yacimiento de más de 11.000 años, y donde la sinodontia debió haberse desarrollado algún tiempo antes.

Hace un par de milenios, el modelo sinodonto llegó, desde el continente asiático, a la isla de Japón. La migración inicial de las gentes que se convertirían en los modernos japoneses se produjo alrededor del año 200 a. C., como testifica la aparición del cultivo de arroz, la metalurgia y los nuevos modelos de asentamientos en una nueva cultura llamada Yayoi. Los dientes de los yayoi presentan gran semejanza con los dientes de los modernos japoneses, pero difieren mucho de los jomon (los sondadontos que habían emigrado a Japón a lo largo de la costa continental diez milenios antes) o de los ainu, sus posibles descendientes. Recientes investigaciones lingüísticas desarrolladas por Paul K. Benedict, de la Universidad estatal de Arizona, sugieren que la lengua japonesa se originó en el sur de China. Su trabajo se complementa con el mío: los dientes de los japoneses me resultan muy semejantes a los de los pueblos del sur de China y a los de las proximidades de Hong Kong.

Mucho después de la gran expansión de los sondadontos, que luego originarían la sinodontia, hubo otra migración de pueblos sondadontos. Esta expansión, tan sólo unas centurias antes del comienzo de la era cristiana, acarreó que familias enteras de agricultores marineros se hicieran a la mar y atravesaran gran parte del Pacífico. Estos grupos de emigrantes eran los que hoy conocemos como polinesios; alcanzaron, hacia oriente, la isla de Pascua, hacia el sur Nueva Zelanda y hacia el septentrión las islas Hawai. Todos los restos humanos recuperados en puntos tan alejados presentan el modelo sondadonto de los pueblos primitivos y actuales del sureste asiático.

Que los polinesios tuvieran su origen en el sureste asiático ha sido confirmado por otros tipos de pruebas. Estudios de lingüística demuestran que todas las lenguas polinesias se parecen a las del sureste de Asia más que a cualquier otro grupo lingüístico importante (tales como los indios americanos, los



4. EVOLUCION DE LA SONDADONTIA Y LA SINODONTIA en el este de Asia, para propagarse más tarde hacia el continente americano y la Polinesia. La sondadontia se desarrolló hace más de 20.000 años, cuando el nivel del mar estaba más bajo que en la actualidad y la plataforma de Sonda permanecía emergida ocupando todo lo que comprende hoy Indonesia. Hace unos 20.000 años antes de la actualidad, algunos sondadontos emigraron hacia el norte; la sino-

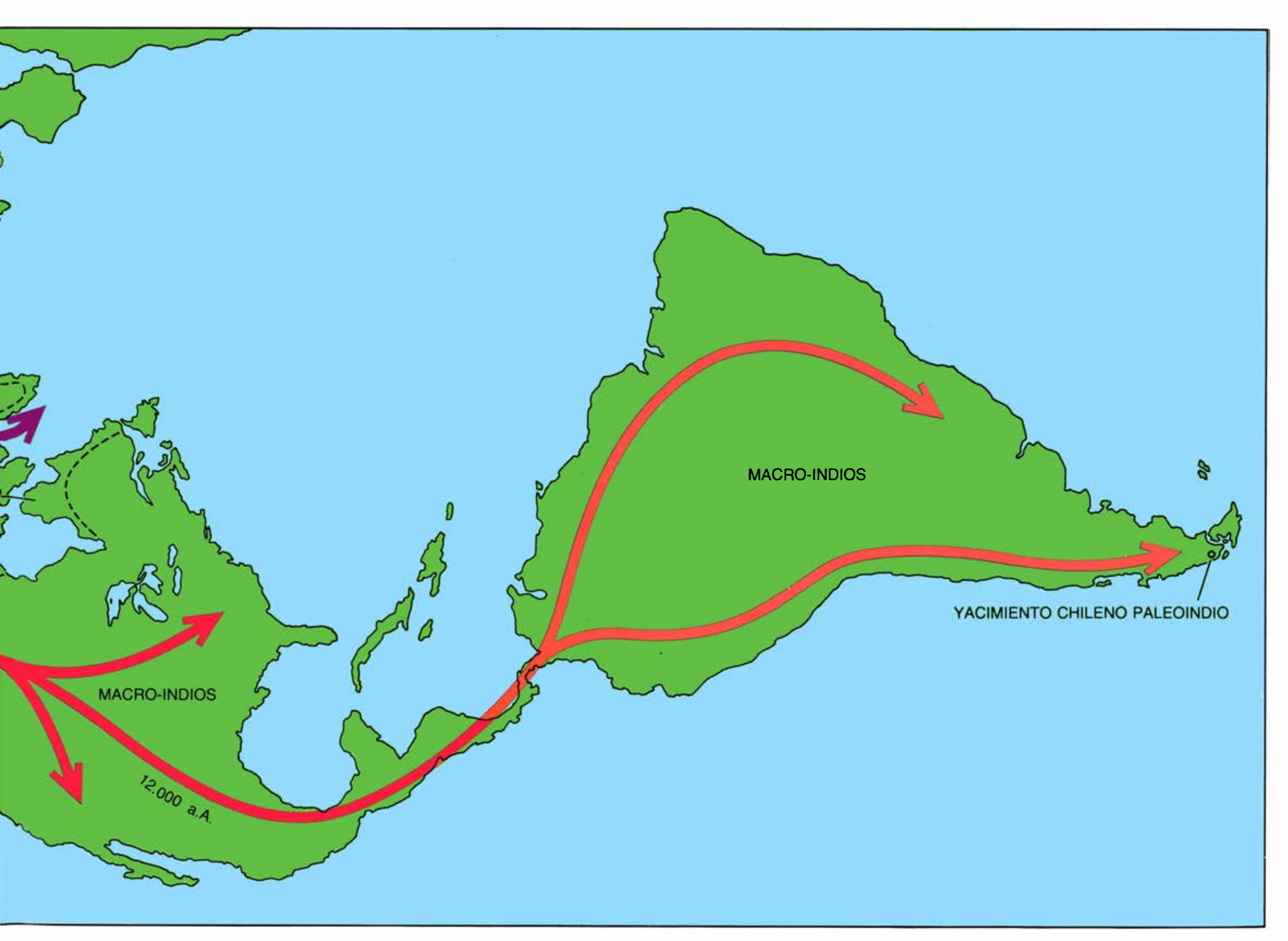
asiáticos del noreste, los australianos o melanesios). Además, los pueblos aborígenes del sureste de Asia comparten elementos culturales muy significativos con los polinesios, incluida la cerámica, tipos de canoas y técnicas de navegación, amén de la agricultura y la domesticación de animales. Durante la Conferencia Arqueológica de Micronesia, que se desarrolló en Guam en 1987, Michael Pietrusewsky, de la Universidad de Hawai en Manoa, William W. Howells, de la Universidad de Harvard, y C. Loring Brace, de la Universidad de Michigan, presentaron sus conclusiones sobre morfología craneal y tamaño de los dientes, que refuerzan aún más esta teoría.

Parece ser que, tras sus inicios, hace más de 20.000 años, el modelo dental sondadonto se propagó rápidamente por Japón, pasó luego al noreste asiático, donde evolucionó el modelo sinodonto, y, mucho después, a las lejanas islas del Pacífico. ¿Qué les sucede entonces al otro grupo importante, los sinodontos? Estos fueron también transhumantes. La historia de la dentición de los pobladores de las Américas muestra de forma bastante clara que los antecesores de todos los nativos americanos actuales procedían del noreste asiático.

La conclusión de que los primeros habitantes del Nuevo Mundo procedían del noreste de Asia no encierra ninguna novedad, pero la antropología dental ha suministrado nuevos datos a este esquema general. La arqueología revela que, hace algo más de 12.000 años, familias de sinodontos siberianos atravesaron el puente de Bering y llegaron a Alaska. Unas cincuenta generaciones más tarde —hace unos 11.000 años—, con una media de unos dieciseis kilómetros por año, habían alcanzado la punta meridional de Chile.

La llegada de grupos migratorios sinodontos al sur de Chile se produjo, según los estudios de Junius B. Bird, del Museo Americano de Historia Natural en Nueva York, alrededor del 11.000 antes de la actualidad. Bird encontró dientes y huesos de paleoindios, intencionalmente incinerados, asociados a huesos de animales extinguidos, a elementos líticos tallados y a hierba seca que se había conservado en cuevas. Todo este material ha proporcionado dataciones fiables de carbono-14. Los dientes de esos paleoindios chilenos muestran un inconfundible modelo sinodonto, incluido uno de los "marchamos" peculiares de la sinodontia: el primer molar inferior trirradiculado.

De las preguntas sobre la gran migración de los pueblos sinodontos, que estuvieron durante mucho tiempo sin respuesta, dos al menos pueden contestarse ya gracias a la antropología dental. La primera: ¿de dónde exacta-



dontia se desarrolló en el norte de China y Siberia. Hace más de 12.000 años, los sinodontos cruzaron el estrecho de Bering emergido y entraron en América. Las pruebas suministradas por la dentición y la lingüística comparada corroboran la hipótesis de que hubo tres oleadas de emigración: los antepasados de los na-dene-parlantes indios de Alaska y de la costa noroeste, los antecesores de los aleutianos y esquimales y los paleoindios, antepasados de los americanos.

mente proceden los pueblos emigrantes? Ya que eran sinodontos, estableciendo una frontera imaginaria de la sinodontia, podremos determinar la región desde donde estos pueblos iniciaron su partida. Mis últimos trabajos abonan la idea según la cual la frontera occidental se extendía a través del lago Baikal y, la meridional, en el norte de China. Esta es, por tanto, el área de donde procedían los emigrantes.

La segunda pregunta inquiere cuántas oleadas migratorias debieron producirse para explicar la enorme variación entre distintos grupos de nativos americanos. Para justificar esa rica morfología se han avanzado hipótesis de muy distinto signo. En un extremo está la opinión de William S. Laughlin, de la Universidad de Connecticut (apoyado en bases ecológicas), por un lado, y de Frederick H. West, del Museo Peabody de Salem en Massachusetts, por otro (basado en datos arqueológicos), que defienden una única oleada. En el otro extremo del espectro, la reciente hipótesis de Charles F. Voegelin, de la Universidad de Indiana, basada en elementos lingüísticos, postula que existieron cientos de grupos migratorios diferentes.

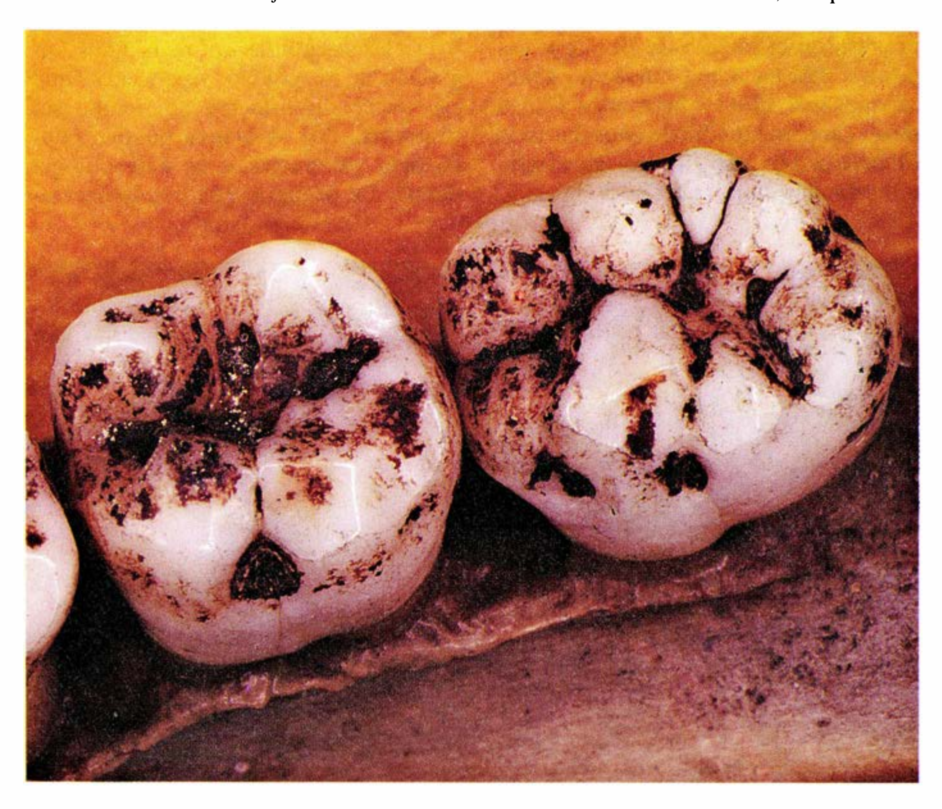
Joseph H. Greenberg, ligüista de la Universidad de Stanford, Stephen L. Zegura, antropólogo físico de la de Arizona, y yo mismo nos inclinamos por un número intermedio de migraciones: tres creemos que se ajusta mejor a los datos extraídos de nuestras investigaciones. Tres grandes migraciones se adecuan a las variaciones observadas en el lenguaje, variaciones genéticas y variaciones del modelo dental, así como a ciertas consideraciones arqueológicas importantes.

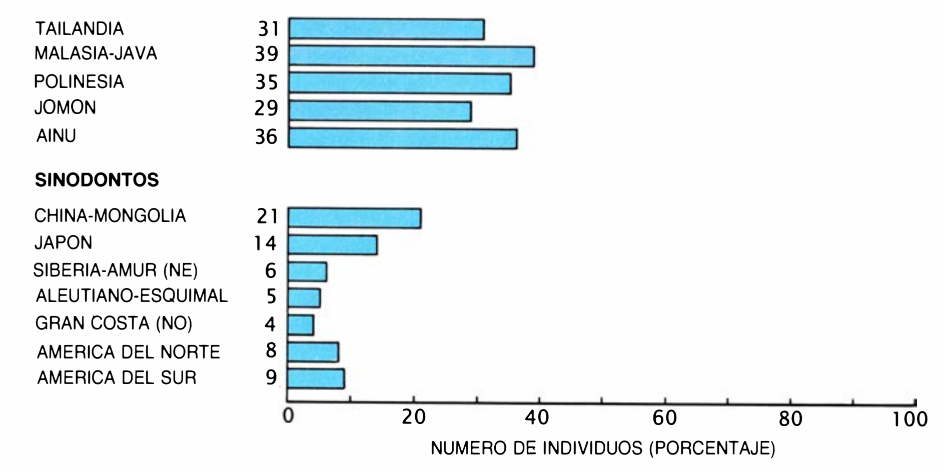
Las tres oleadas, aunque muy posiblemente próximas en el tiempo, originaron grupos que divergerían en tamaño y extensión geográfica. Un grupo incluiría a los paleoindios antepasados de todos los aborígenes sudamericanos y de la mayoría de los norteamericanos. El lenguaje único de estos paleoindios, que eran cazadores, evolucionó luego hasta dar las distintas lenguas de los indígenas de Sur y Norteamérica actuales. Los datos proporcionados por la dentición indican lo mismo. Todos estos grupos tienen, entre otras características, una elevada frecuencia de incisivos en forma de pala, aunque la incidencia de primeros molares inferiores trirradiculados es relativamente baja.

Una segunda oleada de emigración entró en el Nuevo Mundo casi a la vez que la anterior, a lo largo de la costa sur del puente de Bering. Estos pueblos fueron los antepasados de los aleutianos y esquimales actuales, caracterizados por su lenguaje y rasgos de la dentición. Los incisivos en forma de pala presentan una frecuencia relativamente baja; sin embargo, es muy alta la incidencia de los primeros molares inferiores trirradiculados.

La tercera oleada debió de cruzar el puente de Bering algo más tarde. La integraban los antepasados de los navajos y apaches, junto con los pueblos que ocuparon el interior de Alaska y zonas de la Columbia británica. Todos estos pueblos hablan lenguas que configuran una sola familia lingüística: Na-Dené. Estos grupos presentan rasgos dentales con frecuencias intermedias entre los paleoindios y los aleutiano-esquimales. El solapamiento del grupo lingüístico Na-Dené y el originado de acuerdo con los rasgos dentales no es perfecto, pero sí es importante que los datos genéticos proporcionados por los pobladores del Nuevo Mundo apoyen la hipótesis de la existencia de tres unidades originales de emigrantes.

Al comienzo del artículo nos preguntábamos por las relaciones entre la ingente variedad de pueblos, lenguas y culturas de la cuenca del Pacífico y





5. A TRAVES DEL NUMERO DE CUSPIDES distinguimos también entre sondadontia y sinodontia. Los molares tienen, por lo general, cinco cúspides (protuberancias de la superficie masticadora). El segundo molar, más corto, que aparece en el centro de la fotografía sólo posee cuatro. Como se indica en el esquema gráfico, los molares de cuatro cúspides son más comunes en los sondadontos que en los sinodontos.

sus áreas marginales. La dentición ha demostrado ser el hilo que hilvana tamaña variabilidad. Corresponde a un sistema bifurcado en cuya base están los sondadontos del sureste de Asia. Después de la expansión por China y Mongolia hace 20.000 años, se desarrolló la sinodontia entre la población sondadonta del norte. Desde allí, el nuevo modelo se introdujo en la Siberia ártica y, finalmente, a través del puente de Bering, entró en Norteamérica y Suramérica. Mucho más tarde, la población sondadonta migraría de nuevo hasta la Polinesia.

Creo que esta reconstrucción dental explica las líneas principales del poblamiento de la cuenca del Pacífico y sus zonas limítrofes, pero no está en absoluto acabada. Se necesita mayor información sobre la dentición de los aborígenes australianos, los melanesios, los micronesios y los indonesios primitivos. Aunque estos grupos debieron tener sus antepasados en el sureste asiático, se ignora todavía si estos antepasados estuvieron estrechamente relacionados o no con los sondadontos.

Sería deseable, por último, ajustar el modelo sondadonto ancestral a una estructura que abarcara el planeta. El análisis dental sistemático de los movimientos poblacionales está aún en sus inicios como disciplina científica. Es obvio que la mayoría de las investigaciones futuras abordarán los lazos entre los sondadontos y las demás poblaciones del oeste: pueblos surasiáticos y centroasiáticos, grupos del suroeste de Asia, europeos y africanos. Hoy son páginas en blanco de la historia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OUT OF ASIA: PEOPLING THE AMERICAS AND THE PACIFIC. Editado por Robert Kirk y Emöle Szathmary. Journal of Pacific History, Inc., Australian National University, 1985.

DENTOCHRONOLOGICAL SEPARATION ESTIMATES FOR PACIFIC RIM POPULATIONS. Christy G. Turner II en *Science*, vol. 232, n.º 4754, págs. 1140-1142; 30 de mayo de 1986.

THE SETTLEMENT OF THE AMERICAS: A COMPARISON OF THE LINGUISTIC, DENTAL, AND GENETIC EVIDENCE. Joseph H. Greenberg, Christy G. Turner II y Stephen L. Zegura en *Current Anthropology*, vol. 27, n.º 5, págs. 477-497; diciembre de 1986.

LATE PLEISTOCENE AND HOLOCENE POPULATION HISTORY OF EAST ASIA BASED ON DENTAL VARIATION. Christy G. Turner II en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 73, n.º 3, págs. 305-321; julio de 1987.

Metabolismo fotosintético del carbono en plantas superiores

Algunas especies de plantas superiores han desarrollado rutas auxiliares para la asimilación del carbono. Estas permiten aumentar la productividad vegetal y sostener el desarrollo de la planta en condiciones ambientales desfavorables

Daniel H. González, Alberto A. Iglesias, Florencio E. Podestá y Carlos S. Andreo

De la totalidad de energía solar que llega a la Tierra, unos 3×10^{24} joule cada año, aproximadamente el 0,1 por ciento, queda aquí retenido en forma de biomasa, es decir, unos 2×10^{14} kilogramos al año. En efecto, por medio de la fotosíntesis las plantas verdes captan la energía luminosa del sol y la transforman en energía química, utilizable por los organismos vegetales y quienes de ellos se alimentan, para atender a la síntesis de sus componentes celulares.

Esta transformación conlleva la reducción del anhídrido carbónico atmosférico (CO_2) en formas moleculares más complejas y de mayor contenido energético. La fijación fotosintética implica la formación de hidratos de carbono y oxígeno a partir del CO_2 y de agua.

En el cloroplasto, orgánulo de la célula vegetal, concurren dos procesos principales: conversión de la energía luminosa en energía química y conversión del carbono inorgánico en moléculas orgánicas. Proceso dual que nos permite, contemporáneamente, distinguir dos fases en la fotosíntesis, a saber, una etapa luminosa y otra sintética propiamente dicha.

La etapa luminosa, que no detallaremos en el presente trabajo, involucra la captación de la energía solar por parte de pigmentos especiales que se alojan en la membrana tilacoide del cloroplasto. El principal pigmento vegetal implicado es la clorofila. La energía solar captada sirve para producir trifosfato de adenosina (ATP), una molécula con alto contenido energético, y para llevar a cabo el tránsito de electrones desde el agua, que se escinde con liberación de oxígeno, hasta el dinucleótido-fosfato de nicotinamida y adenina (NADP), que se reduce entonces a NADPH. La etapa sintética comprende la utilización del contenido energético del ATP y del poder reductor del NADPH para realizar la conversión del CO_2 en carbohidratos.

Las plantas superiores llevan a cabo más de la mitad de la fijación fotosintética del carbono de la biosfera, asimilación que realizan a través del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. Las reacciones que componen dicha vía metabólica se descubrieron con ciertos trazadores radiactivos, en una época temprana del establecimiento de éstos.

Durante las primeras décadas del presente siglo se creía todavía que el proceso fotosintético consistía primordialmente en la ruptura del CO_2 por la luz y en la posterior hidratación del carbono para formar carbohidratos. Experimentos realizados en la década de 1930 por C. B. Van Niel, de la Estación Marina Hopkins de la Universidad de Stanford, le llevaron a postular que la reacción primaria de la fotosíntesis era la fotolisis del agua. Esta hipótesis recibió un sólido apoyo experimental en los años cuarenta, cuando S. Ruben y M. Kamen, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron que el oxígeno desprendido durante el proceso fotosintético procedía íntegramente del agua; utilizaron en el ensayo agua marcada con O-18, un isótopo del oxígeno.

Quedaba entonces por dilucidar la vía por la cual el CO_2 se reducía a carbohidratos. Ruben y Kamen iniciaron otros experimentos con el propósito de caracterizar el destino que sufría el carbono. Emplearon de elemento trazador, con ese propósito, C-11, un isótopo radiactivo del carbono. Pero fracasaron por culpa de la corta vida media de ese radioisótopo –dura unos 20 minutos– y por el pobre desarrollo que por entonces habían alcanzado las técnicas de separación.

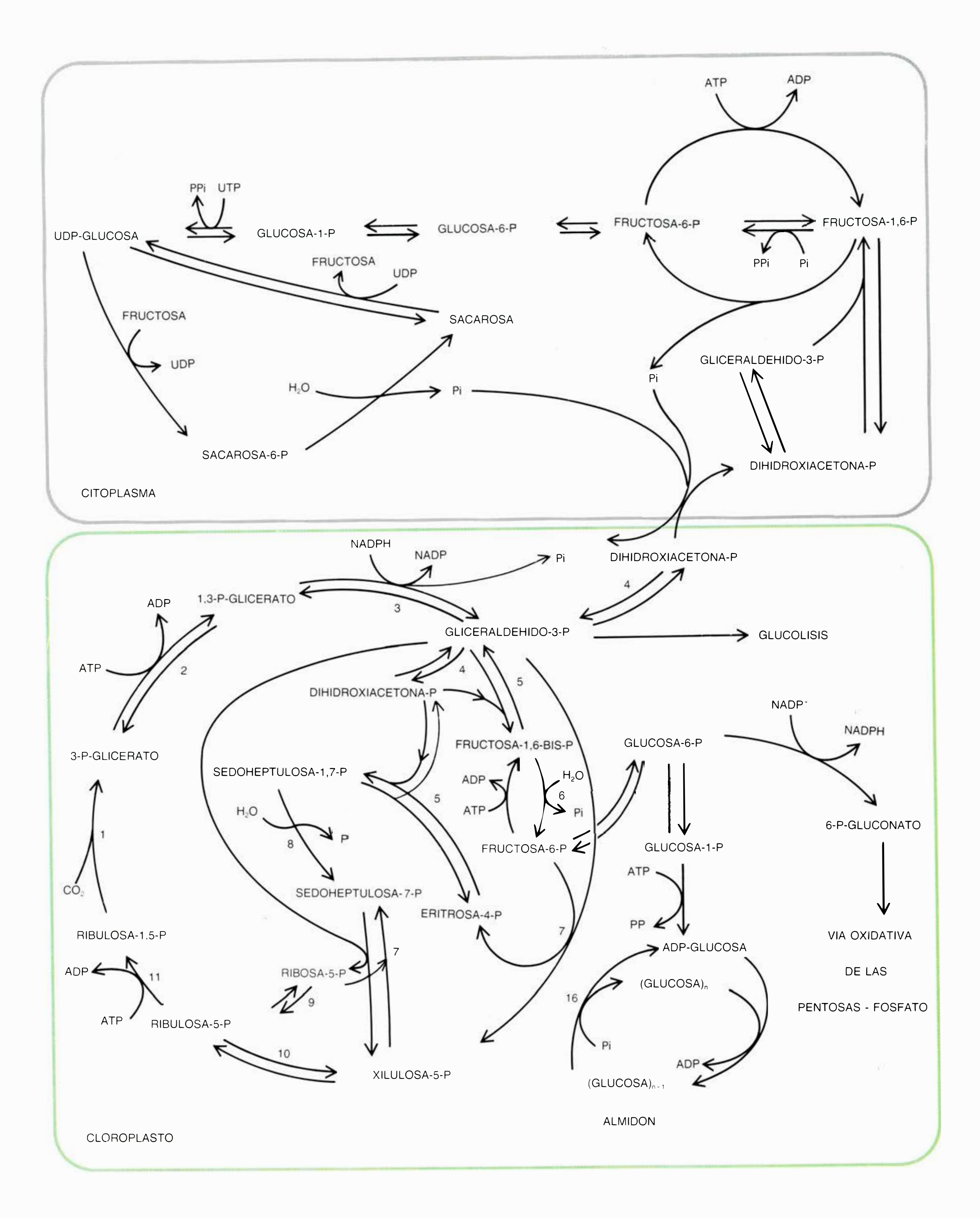
Fue el descubrimiento del C-14, isótopo radiactivo de larga vida media –más de 5000 años–, por parte de ambos investigadores lo que permitió disponer de un trazador adecuado. Llegamos así a la década de los cincuenta, cuando M. Calvin, A. A. Benson y colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, desentrañaron la ruta metabólica de la fotoasimilación del carbono; se valieron de anhídrido carbónico con C-14 en experimentos de pulso y caza y caracterizaron las actividades enzimáticas implicadas. Esa vía se conoce técnicamente por ciclo reductivo de las pentosas-fosfato, cuando se atiende a los metabolitos intermediarios de la misma, y por ciclo de Ben-

DANIEL H. GONZALEZ, ALBERTO A. IGLESIAS, FLORENCIO E. PODESTA y CARLOS S. ANDREO constituyen un grupo de investigación en el Centro de Estudios Fotosintéticos y Bioquímicos de Rosario (Argentina), orientado hacia la fotosíntesis en plantas superiores. González y Podestá, docentes en la facultad de ciencias bioquímicas y farmacéuticas de la Universidad Nacional de Rosario, son becarios del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). Iglesias es profesor en la misma facultad, al igual que Andreo, quien es director del grupo; ambos pertenecen a la Carrera de Investigador Científico del CONICET.

1. ALGUNAS VARIANTES en el metabolismo de asimilación de carbono permiten un crecimiento más eficiente de ciertas especies vegetales. Así, el maíz (*arriba, derecha*), una planta C_4, presenta un rápido crecimiento en climas cálidos comparado con el de la soja (*arriba, izquierda*) y el trigo (*abajo*) que son especies C_3. Se denominan plantas C_3 y C_4 según sean los primeros metabolitos intermediarios.







2. CICLO REDUCTIVO DE LAS PENTOSAS-FOSFATO: constituye una vía metabólica para la fijación fotosintética del anhídrido carbónico (CO_2). La ruta es común a todas las plantas superiores e involucra la participación de once enzimas diferentes (*numeradas correlativamente*). La primera reacción es la carboxilación de la ribulosa-1,5-bifosfato catalizada por la RuBisCO. El 3-fosfoglicerato así producido es reducido a triosas-fosfato con consumo de ATP y NADPH. A partir de las triosas-fosfato, se dan una serie de reacciones que llevan a la regeneración del aceptor primario de anhídrido carbónico, a la síntesis de almidón en el mismo cloroplasto o la de sacarosa en el citoplasma celular. Muchas de las intermediarias del ciclo participan en otras rutas biodegradativas.

son-Calvin, en homenaje a sus descubridores. Aunque la caracterización se realizó utilizando un alga unicelular del género *Chlorella*, no tardó en demostrarse que el ciclo era común a casi todos los organismos fotosintéticos.

Veamos la ruta con cierto detenimiento. La primera etapa de la vía corresponde a la carboxilación de la ribulosa-1,5-bifosfato para rendir dos moléculas de 3-fosfoglicerato (los números arábigos denotan el lugar que ocupan los grupos fosfato, unidos por un enlace éster en la cadena carbonada). Esa reacción viene catalizada por una enzima: la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa, que se abrevia RuBisCO (la barra de corte significa que la RuBisCO puede catalizar, además, la oxigenación de la ribulosa-1,5-bifosfato). Esta enzima representa el 50 por ciento de la proteína soluble de las hojas verdes, constituyéndose así en la proteína más abundante del planeta.

Si la primera etapa era de carboxilación, la segunda es de reducción. A lo largo de la misma, el 3-fosfoglicerato se transforma en gliceraldehído-3-fosfato a través de dos reacciones que consumen ATP y NADPH.

El ciclo se completa con la tercera etapa, en la que una serie de reacciones en las que participan azúcares-fosfato de 3 a 7 átomos de carbono conducen a la regeneración del aceptor primario de CO_2, esto es, la ribulosa-1,5-bifosfato.

Como resultado del funcionamiento del ciclo de Benson-Calvin se produce la incorporación neta de carbono inorgánico en moléculas orgánicas. Esto permite que algunos de sus intermediarios deriven hacia la síntesis de sacarosa y almidón como productos finales de la fijación y que, además, pueda regenerar sus intermediarios en forma autocatalítica.

La biosíntesis de esas dos moléculas, sacarosa y almidón, se realiza a partir de las triosas-fosfato. El almidón constituye el principal polisacárido de reserva de las plantas; la sacarosa, el carbohidrato del que sacan especial provecho los demás tejidos de la planta. La ruta que lleva a la producción del almidón se halla íntegramente localizada dentro del cloroplasto, en tanto que la síntesis de la sacarosa se desarrolla en el citoplasma. Ello significa que existe una partición del carbono asimilado, que varía según la especie vegetal y que vendrá condicionada por los niveles de triosas-fosfato que haya en uno u otro compartimiento. El transporte de dichas triosas-fosfato entre el cloroplasto y el citoplasma se produce a través de un translocador específico que tiene su sede en la membrana del cloroplasto, cuya acción permite el intercambio entre las triosas-fosfato y el fosfato. Este último compuesto no sólo es importante para determinar el destino de las triosas-fosfato, sino que también su reingreso al cloroplasto es necesario para regenerar ATP por medio de la etapa luminosa.

El destino de las triosas-fosfato dependerá también de los mecanismos de regulación que afecten a las velocidades de las vías de síntesis y degradación de almidón y sacarosa. En este sentido, la enzima ADP-glucosa pirofosforilasa, de la ruta biosintética del almidón, es inhibida por fosfato y activada por 3-fosfoglicerato. La degradación del polisacárido ocurre solamente durante la noche, porque, en presencia de luz, la fosfofructoquinasa es inhibida por varios metabolitos (NADPH, fosfoenolpiruvato y fosfoglicolato) y otra enzima que interviene también en la síntesis del almidón, la glucosa-6-fosfato deshidrogenasa, queda bloqueada por el sistema de la tiorredoxina.

Las rutas de producción y consumo de sacarosa están fundamentalmente moduladas en el dominio de la fructosa-1,6-bifosfatasa y de la fosfofructoquinasa dependiente de pirofosfato que participan en las vías de síntesis y degradación. La regulación más importante está dada por un metabolito, la fructosa-2,6-bifosfato, que actúa en muy bajas concentraciones (del orden del micromolar) para fomentar la degradación de la sacarosa e inhibir su síntesis. A su vez, los niveles de fructosa-2,6-bifosfato se incrementan por fructosa-6-fosfato y fosfato, y caen por triosas-fosfato, con lo que el sistema regulador se hace muy eficaz.

Además de los requerimientos de ATP y NADPH por parte de la etapa sintética, existe un segundo nivel de dependencia de la luz dado por la fotorregulación de algunas enzimas que componen el ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. Se han descrito dos mecanismos por medio de los cuales se lleva a término tal regulación: por la variación en los niveles de diferentes metabolitos en el estroma del cloroplasto y por la modificación que sufren las enzimas después de la traducción. Ambos procesos están inducidos por la luz.

El transporte de electrones que se opera durante la fotosíntesis promueve el tránsito de protones (H^+) desde el estroma (solución amorfa limitada por las estructuras cloroplastídicas) hacia el interior de la tilacoide (pequeños sacos lenticulares formados por membranas especializadas del interior del cloroplasto), provocando una alcalinización del primero. En virtud de ello, el *p*H del estroma varía desde un valor neutro, de 7, en oscuridad, a un valor ligeramente básico, de 8 a 8,5, en luz. Si tenemos en cuenta que varias de las enzimas del ciclo de Benson-Calvin tienen un *p*H óptimo de actividad cercano a 8, entenderemos que funcionen mejor en el medio alcalino del cloroplasto iluminado. Sumado a esto, existe un transporte de cationes magnesio (Mg^{2+}) en sentido inverso al de H^+, con lo que se incrementan las concentraciones del catión divalente en el estroma y, con ello, la actividad de las enzimas que lo requieren como cofactor.

El aumento del potencial de reducción provocado por la luz es, en parte, utilizado para producir la activación de algunas enzimas del ciclo de Benson-Calvin mediante sistemas reguladores específicos. Existen dos modelos para explicar el mecanismo de fotoactivación. En uno de ellos se produce la reducción de un puente disulfuro en una proteína soluble, denominada tiorredoxina, a partir de la ferredoxina; esta reacción viene catalizada por una reductasa específica. La tiorredoxina reducida provoca la activación de varias enzimas: gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa, sedoheptulosa-1,7-bifosfatasa, fructosa-1,6-bifosfatasa y fosforribuloquinasa. Según el otro modelo postulado, la luz provocaría la reducción de un componente de la membrana tilacoide que sería el que luego mediaría la modificación de las enzimas hacia un estado más activo.

En ambos modelos, la desactivación en oscuridad ocurriría por reversión del proceso provocada por algún componente generado en el período oscuro, cuya naturaleza es aún desconocida. De los dos sistemas reguladores, el primero es el que cuenta, hasta el presente, con mayor respaldo experimental.

Algunas de las enzimas del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato muestran un comportamiento histerético (término que indica que el proceso de activación o inhibición de la enzima es más lento que el catalítico). Así la RuBisCO necesita de una activación previa para producir la catálisis, activación que consiste en la formación de un carbamato a partir de CO_2 y un gru-

po ε-amino de un resto de lisina de la proteína, con posterior unión de Mg^{2+}.

El sitio de activación de la enzima es distinto del sitio de catálisis. El estado de activación alcanzado depende de las concentraciones de CO_2 y Mg^{2+}, así como también del *p*H. De acuerdo con esto, y teniendo en cuenta los cambios producidos por la luz en el estroma cloroplástico, la actividad de la RuBisCO se verá favorecida en condiciones de iluminación. Otra enzima que muestra un comportamiento histerético es la gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa dependiente de NADP, que es actividada en forma concertada por determinados metabolitos: NADPH, fosfato, 3-fosfoglicerato y ATP.

Recientemente se ha detectado en las hojas la presencia de un potente inhibidor de la RuBisCO: el 2-carboxi-D-arabinitol-1-fosfato. El considerable aumento de los niveles de este compuesto en oscuridad sugiere que el mismo podría tener importancia en la regulación de la actividad de la enzima. También se ha informado que la RuBisCO se halla sujeta a procesos de fosforilación y desfosforilación, aunque se ignora el efecto que éstos pudieran encerrar.

Además de catalizar la carboxilación de la ribulosa-1,5-bifosfato, la RuBisCO posee una actividad oxigenasa, es decir, reacciona con el oxígeno molecular (O_2) para rendir 3-fosfoglicerato y 2-fosfoglicolato. Ambas actividades –carboxilasa y oxigenasa– cursan a través de un intermediario químico común y ocurren en el mismo sitio activo de la enzima. Ello provoca una competencia entre el O_2 y el CO_2, de la que dependerá la partición entre una y otra reacción.

La actividad oxigenasa inicia un proceso denominado fotorrespiración (consumo de O_2 y liberación de CO_2 dependiente de luz) que involucra la participación de distintos orgánulos y que provoca la oxidación del carbono orgánico y su consiguiente pérdida. Es fácil observar que esta vía (eminentemente oxidativa) se opone al ciclo reductivo de las pentosas-fosfato y provoca una pérdida de poder energético y de equivalentes de reducción (los componentes necesarios para la síntesis del carbono orgánico) en las células fotosintéticas.

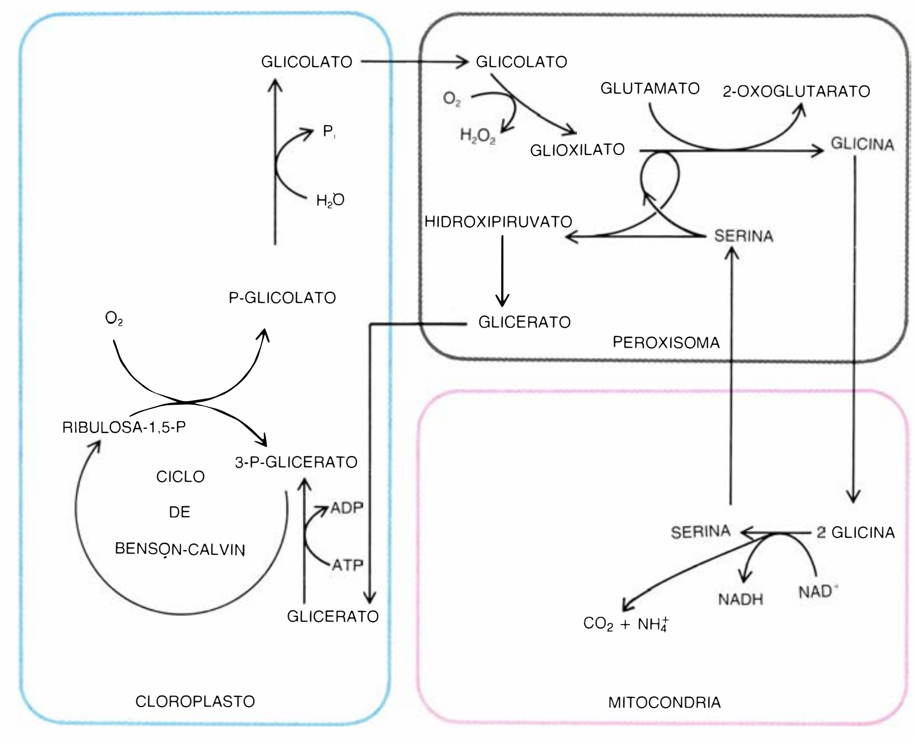
En el proceso fotorrespiratorio, por cada molécula de CO_2 producida en el mismo se consumen cuatro moléculas de ATP y cinco equivalentes de reducción, a lo que debe agregarse el costo originado por la pérdida de un átomo de carbono en estado reducido. En la práctica se ha observado que el proceso fotorrespiratorio puede ocasionar pérdidas de hasta un 30 por ciento del carbono fijado, lo que provoca una disminución en la eficiencia del proceso fotosintético. Aunque se han postulado algunas funciones para la fotorrespiración, se suele aceptar que no es otra cosa que mera consecuencia de la actividad oxigenasa de la RuBisCO.

La disminución o supresión de la fotorrespiración provocaría, al menos en teoría, un aumento en la productividad vegetal. Para esto, debería disminuirse o anularse la actividad oxigenasa de la RuBisCO manteniendo la actividad carboxilasa, ante la ineficiencia comprobada de las alteraciones en las otras etapas de la vía fotorrespiratoria.

Si la fotorrespiración fuera un proceso indeseable para las especies vegetales, cabría esperar que evolutivamente se hubieran desarrollado mecanismos para suprimirla. En efecto, se ha observado que la RuBisCO de plantas superiores tiene una relación de actividad carboxilasa a oxigenasa mayor que la enzima de bacterias fotosintéticas. Entre los cambios sufridos por la proteína se puede citar la diferente estructura oligomérica. Así, la RuBisCO de la bacteria *Rhodospirillum rubrum* tiene una estructura dimérica, formada por dos subunidades de igual peso molecular. En cambio, la enzima de plantas superiores está compuesta por ocho subunidades grandes (peso molecular de 51.000 a 58.000), que contienen los sitios activos, y ocho subunidades pequeñas (de peso molecular entre 12.000 y 18.000). Sin embargo, el proceso más eficaz a la hora de suprimir la fotorrespiración es aquel que recurre a un metabolismo que incrementa la presión parcial de anhídrido carbónico en el sitio de acción de la RuBisCO.

Hacia fines de la década de 1950, H. Kortschak y colaboradores, de la Estación Experimental de Plantadores de Azúcar de Hawai, al realizar ensayos de pulso y caza con hojas de caña de azúcar, observaron que el seguimiento del marcador radiactivo mostraba un modelo diferente del informado por Calvin y Benson, ya que el C-14 del CO_2 se incorporaba inicialmente en compuestos de cuatro átomos de carbono. M. D. Hatch y D. R. Slack, a la sazón en el Centro de Investigación Vegetal David North, de Queensland (Australia), confirmaron estas observaciones e iniciaron un estudio para desentrañar la base bioquímica del proceso. Y así, a mediados de la década de 1960, se dispuso de la información necesaria para postular la existencia de una ruta auxiliar de fijación del carbono, el denominado metabolismo C_4, o ciclo de Hatch y Slack.

El nombre de ruta metabólica C_4

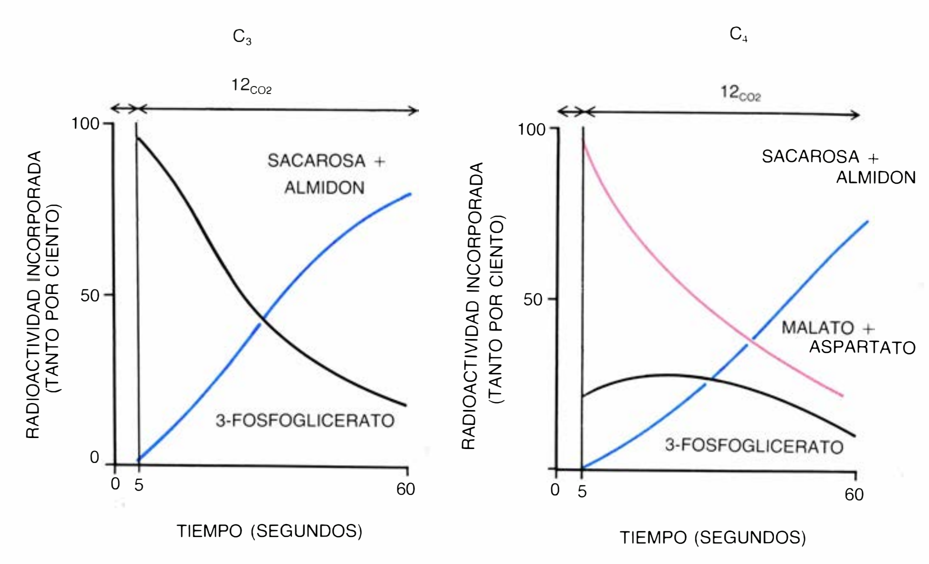


3. EL PROCESO DE LA FOTORRESPIRACION se inicia con la oxigenación de la ribulosa-1,5-bifosfato, con producción de 2-fosfoglicolato (*esquema de la izquierda*). La vía metabólica involucra una serie de reacciones que ocurren en diferentes orgánulos y que provocan la liberación de CO_2 en la mitocondria (*abajo*).

(y de plantas C_4 a las especies que poseen esta vía) se debe a que los primeros compuestos producidos a raíz de la fijación del CO_2 atmosférico son ácidos orgánicos de cuatro átomos de carbono. En contraposición con ello, se denominan plantas C_3 a las especies vegetales que asimilan CO_2 sólo mediante el ciclo reductivo de las pentosas-fosfato, llamado también metabolismo C_3, dado que los primeros metabolitos intermediarios son compuestos de tres átomos de carbono (triosas-fosfato).

Las plantas superiores que poseen esta vía metabólica (plantas C_4) comprenden numerosas especies vegetales de zonas tropicales y subtropicales, algunas de la importancia económica del maíz, la caña de azúcar y el sorgo. Estas plantas comparten una serie de características que guardan relación con el metabolismo del carbono: rápido crecimiento, baja tasa de fotorrespiración y de pérdida de agua por unidad de materia producida y una anatomía foliar en corona (o "Kranz"). Este último rasgo se debe a la presencia de dos tipos de células fotosintéticas: las mesofílicas y las de la vaina vascular (o túnico-vasculares).

Puede considerarse que la ruta auxiliar de fijación del carbono opera, en las plantas C_4, como una bomba impulsora de CO_2 desde la atmósfera hasta las células de la vaina vascular, lugar donde se localizan las enzimas del ciclo de Benson-Calvin. De esta forma, se incrementa la presión parcial de CO_2 en los cloroplastos túnico-vasculares, de lo que resulta un aumento de la actividad carboxilasa de la RuBisCO en detrimento de la actividad oxigenasa.



4. EXPERIMENTOS DE PULSO Y CAZA. Se suministra a células fotosintéticas un pulso (5 segundos) de CO_2 cuyo carbono sea el isótopo radiactivo de larga vida media: C-14; luego, se realiza la caza (análisis del destino de la marca radiactiva en extractos celulares obtenidas a distintos tiempos) en presencia de CO_2.

Podemos distinguir tres etapas en el ciclo de Hatch y Slack: carboxilación, descarboxilación y regeneración del aceptor primario de carbono. La entrada de CO_2 atmosférico en el sistema ocurre, en el citoplasma de las células mesofílicas, mediante su incorporación en el átomo de carbono 3 del fosfoenolpiruvato con producción de un compuesto de cuatro carbonos: el oxaloacetato. Esta carboxilación viene catalizada por la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa. El oxaloacetato, un cetoácido, se estabiliza por reducción en el cloroplasto o por transaminación en el propio citoplasma rindiendo malato o aspartato, respectivamente.

La descarboxilación puede ocurrir por distintos mecanismos. Tres enzimas catalizan este proceso, aunque en cada especie sólo predomina una de ellas. Estas descarboxilasas, que poseen distinto asiento en las células de la vaina vascular, permiten clasificar las plantas C_4 en tres subgrupos: enzima málica dependiente de NADP, enzima málica dependiente de NAD y fosfoenolpiruvato carboxiquinasa. Cada subgrupo posee sus propios niveles de otras enzimas del ciclo, así como de los metabolitos intermediarios del mismo. Hay, en consecuencia, ligeras variaciones del metabolismo C_4, determinadas por los valores relativos de las actividades enzimáticas desarrolladas.

El CO_2 producido en la etapa descarboxilativa se fija entonces definitivamente en los cloroplastos de las células túnico-vasculares a través del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. El otro producto de la descarboxilación ingresa en la tercera etapa de la ruta C_4, la que conduce a la regeneración del aceptor primario del CO_2 atmosférico. Esto ocurre, en última instancia, en los cloroplastos de las células mesofílicas donde la enzima piruvato fosfato diquinasa cataliza la conversión de piruvato en fosfoenolpiruvato a expensas de ATP.

La fijación de una molécula de CO_2 por la ruta C_4 requiere dos moléculas más de ATP que en el metabolismo C_3. Ese gasto energético adicional se ve largamente compensado por el ahorro de energía que significa mantener la fotorrespiración en niveles muy bajos.

Cabe destacar que las plantas C_4 rinden más en condiciones de alta iluminación y alta temperatura ambiente, es decir, por encima de los 30 grados C. Ello obedece a que la generación de ATP por la etapa luminosa aumenta continuamente con la iluminación solar en las plantas C_4, mientras que en las C_3 se produce una saturación con niveles relativamente bajos de luz; una temperatura elevada favorece el proceso fotorrespiratorio porque la solubilidad del O_2, con respecto al CO_2, aumenta en ese sentido. Unese a ello que varias enzimas del metabolismo C_4 son menos activas a bajas temperaturas.

No es difícil comprender que, para un adecuado funcionamiento del proceso de asimilación de carbono en las plantas C_4, es necesario que exista una coordinación entre las rutas auxiliar y principal de fijación de CO_2. Varias de las enzimas que participan en el ciclo de Hatch y Slack son reguladas por cambios inducidos por la luz. Ocurre eso con la proteína que cataliza la primera reacción de la ruta metabólica C_4: la fosfoenolpiruvato carboxilasa, enzima que, por otro lado, se localiza también en células fotosintéticas con metabolismo C_3 y en tejidos no fotosintéticos, aunque cumple en cada caso funciones distintas. La activación por la luz de la carboxilasa se ha relacionado con modificaciones covalentes en sus residuos aminoácidos, ya sea reducción de puentes disulfuro o fosforilación de restos de serina.

La regulación de la actividad de la fosfoenolpiruvato carboxilasa se produce a través de diferentes mecanismos. Varios ácidos orgánicos son inhibidores de la enzima, como el malato y el aspartato, principales metabolitos intermediarios de la ruta C_4. En el polo opuesto, como activador alostérico de la enzima, tenemos la glucosa-6-fosfato, que incrementa tanto la velocidad máxima de la enzima como su afinidad por el fosfoenolpiruvato. La regulación por estos efectores establece un mecanismo de retroalimentación que responde al nivel de funcionalidad de

todo el proceso de asimilación del carbono. De ese modo, en la medida en que el ciclo reductivo de las pentosas-fosfato opere producirá glucosa-6-fosfato, y ésta inducirá una mayor actividad de la fosfoenolpiruvato carboxilasa y, en consecuencia, un mayor aporte de carbono al sistema. Por contra, una acumulación de malato o aspartato inhibirá la fijación del CO_2 atmosférico. Asimismo, la glucosa-6-fosfato minimiza el efecto inhibidor del malato, con lo que fomenta el rendimiento de este mecanismo regulador.

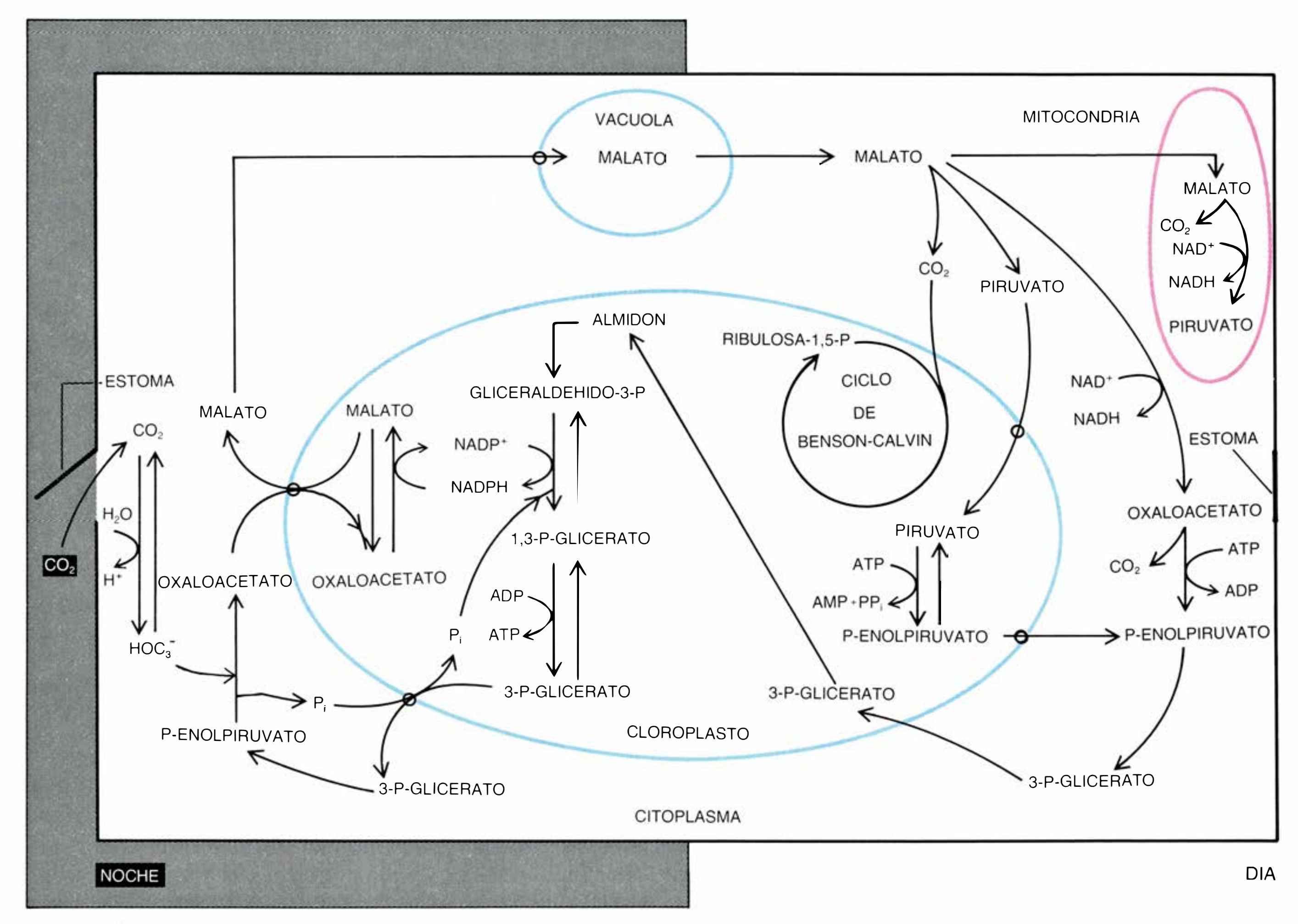
Las propiedades cinéticas y reguladoras de la fosfoenolpiruvato carboxilasa de plantas C_4 dependen del *p*H. La enzima tiene un *p*H óptimo de 8; cuando se aproxima a un valor neutro muestra una menor afinidad por el fosfoenolpiruvato, así como una mayor sensibilidad a la regulación por efectores. De este modo, la concentración intracelular de protones sería un importante factor determinante de la actividad fisiológica de la enzima.

La reducción del oxaloacetato, catalizada por la enzima malato deshidrogenasa dependiente de NADP, en cloroplastos de las células mesofílicas, para dar malato y NADP, se halla también sujeta a regulación. La afinidad de esta enzima por el malato es unas mil veces menor que por el oxaloacetato, por lo que la reacción, a pesar de ser reversible, cursa mayoritariamente en el sentido de la reducción del ácido orgánico. La actividad de esta enzima depende estrechamente del transporte fotosintético de electrones, porque éste incrementa los niveles de NADPH; además, la deshidrogenasa es activada por la luz a través del sistema de la ferredoxina-tiorredoxina. Se ha demostrado, en efecto, que la malato deshidrogenasa se halla en una forma inactiva en hojas mantenidas en oscuridad y que la luz promueve su activación por reducción de puentes disulfuro en un proceso mediado por tiorredoxina.

De las enzimas implicadas en la etapa descarboxilativa, la más estudiada es la málica dependiente de NAD. Presenta ésta distintos estados oligoméricos (es decir, formas de distinto peso molecular causadas por asociación de sus cadenas polipeptídicas); la interconversión de los cuales se halla gobernada principalmente por malato, *p*H y Mg^{2+}. La conversión de la enzima de una forma dimérica, relativamente inactiva, a una tetramérica, activa, favorecida por malato, podría ser importante en la regulación fisiológica de esta actividad. La enzima málica dependiente de NAD se regula también alostéricamente, siendo activada por la fructosa-1,6-bifosfato, metabolito que regularía el nivel de actividad descarboxilasa por retroalimentación positiva, dado que su concentración crece con el funcionamiento del ciclo de Benson-Calvin.

Otra enzima, la piruvato fosfato diquinasa, cataliza la reacción de regeneración del fosfoenolpiruvato en los cloroplastos de las células mesofílicas, a partir de piruvato, fosfato y ATP. La posterior acción de una pirofosfatasa inorgánica intracloroplástica produce la hidrólisis del pirofosfato, desplazando el equilibrio hacia la formación de fosfoenolpiruvato.

La diquinasa de plantas C_4 es fuertemente activada en presencia de luz. El mecanismo molecular de esta regulación involucra una proteína reguladora específica, la que induce la interconversión de las formas activa e inac-



5. METABOLISMO ACIDO DE LAS PLANTAS CRASULACEAS. Implica éste la separación temporal entre la asimilación del CO_2 atmosférico (etapa nocturna) y el funcionamiento del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato (etapa diurna). Existen dos subgrupos descritos según la descarboxilación oscura.

tiva de la enzima. La fosforilación de un residuo de treonina de la diquinasa por el grupo fosfato de la posición beta del ADP insta la síntesis de una forma inactiva de la piruvato fosfato diquinasa. La posterior activación de esta enzima ocurre por fosforolisis del residuo de fosfotreonina, con producción de pirofosfato. Ambos procesos son catalizados en dos sitios diferentes de la proteína reguladora.

Ante la rígida compartimentalización de las etapas del metabolismo C_4, se hace necesario un eficiente transporte intra e intercelular de los metabolitos. Varios son los sistemas de transporte. Uno primero: un translocador de dicarboxilatos localizado en la envoltura; opera intercambiando oxaloacetato y malato entre el citoplasma y el interior del cloroplasto. Otro: con la misma ubicación que el primero, hay un transportador que intercambia fosfoenolpiruvato y fosfato, sustrato y producto respectivos de la primera etapa de la ruta metabólica. Un tercero: la entrada de piruvato en los cloroplastos de las células mesofílicas se produce a través de un transporte activo estimulado por la luz. Un cuarto: en la entrada de malato y salida de piruvato de los cloroplastos de las células túnicovasculares de especies del tipo de la enzima málica dependiente de NADP participarían transportadores específicos. Por último: con respecto al transporte intercelular, éste se produce por difusión simple; los gradientes de concentración necesarios para que esto ocurra son provocados, en las células mesofílicas, por la entrada activa de piruvato en los cloroplastos y por los altos niveles de malato producidos como consecuencia de la fijación del CO_2 atmosférico.



6. LAS PLANTAS CAM constituyen un interesante ejemplo de adaptabilidad biológica a zonas áridas. Un típico ejemplar que exhibe las características hojas carnosas de estas plantas es la especie *Agave americana*.

Algunas plantas superiores han desarrollado mecanismos que les permiten subsistir en zonas extremadamente áridas. Entre éstos, reviste particular importancia la existencia de una vía metabólica especializada en la asimilación fotosintética del CO_2. Se trata del metabolismo ácido de las Crasuláceas (abreviado CAM por sus siglas en inglés); se denominan plantas CAM a las especies vegetales que lo poseen. Pueden distinguirse dos clases de plantas CAM: constitutivas u obligadas y facultativas o inducibles. Las primeras poseen este metabolismo continuamente, mientras que las otras lo exhiben sólo bajo determinadas condiciones ambientales.

La estrategia desarrollada evolutivamente por este tipo de plantas consiste en la existencia de una ruta auxiliar de asimilación de CO_2 que opera separada del ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. El metabolismo CAM tiene por función asimilar el CO_2 externo en oscuridad, con lo que se pueden mantener los estomas cerrados durante el día, disminuyendo al máximo los intercambios con el medio ambiente y, consecuentemente, la pérdida de agua. Por ser elevada, en el interior celular, la presión parcial del CO_2 durante el día, cae asimismo la fotorrespiración.

La vía auxiliar es similar a la desarrollada por las plantas C_4, con la salvedad de que ocurre en un solo tipo de célula fotosintética. Durante la noche, el CO_2 atmosférico se fija por la reacción de la fosfoenolpiruvato carboxilasa; el oxaloacetato que se produce se transforma en malato en el cloroplasto. Este último compuesto no se metaboliza enseguida, sino que se acumula en vacuolas celulares y llega a alcanzar altos niveles. Durante el día, el malato se utiliza como fuente de CO_2 para la operación del ciclo de Benson-Calvin. Estas fluctuaciones temporales en los niveles de ácidos orgánicos son de tal magnitud que llamaron la atención de algunos observadores, siglos atrás, quienes advirtieron que el gusto de las hojas de ciertas plantas variaba a lo largo del día.

Lo mismo que en la ruta C_4, existen distintos subgrupos de plantas CAM según la enzima que cataliza la etapa descarboxilativa. El producto de tres átomos de carbono originado por la descarboxilación diurna se metaboliza y forma fosfoenolpiruvato, que ya es aprovechable para el proceso de síntesis de nueva glucosa (gluconeogénesis). El fosfoenolpiruvato que se precisa para la carboxilación primaria durante la noche lo aporta la glucolisis (degradación de glucosa). Vemos ahí un criterio diferenciador entre el metabolismo C_4 y el de tipo CAM.

La eficacia del metabolismo CAM se funda en la separación temporal de las reacciones que lo componen, lo que supone la existencia de adecuados mecanismos de regulación. El hecho más notable es que la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa se activa sólo en condiciones de oscuridad, cuando se halla desactivado el ciclo reductivo de las pentosas-fosfato. La enzima puede, efectivamente, existir bajo dos formas interconvertibles: una nocturna (fosforilada), que exhibe una gran afinidad por el fosfoenolpiruvato y es, en cambio, bastante insensible a la regulación por malato (inhibidor) y por glucosa-6-fosfato (activador), y otra forma diurna (no fosforilada), con características antagónicas.

El transporte intracelular de malato tiene también importancia en el funcionamiento del metabolismo CAM. La abundante cantidad de ese compuesto producida durante el período oscuro exige su compartimentalización en vacuolas, a fin de no afectar las condiciones químicas del medio celular. La entrada de malato a la vacuola se produce por un transporte activo acoplado al movimiento de dos protones en el mismo sentido. La salida durante el día, en cambio, se produce pasivamente.

Dadas las características del metabolismo CAM, su regulación implica la presencia de mecanismos que reconozcan ciclos diurnos; algo así como un

"reloj biológico". Otros factores –citemos los niveles de agua ambiental y en los tejidos, las concentraciones atmosféricas de CO_2 y O_2, la temperatura diurna y nocturna, la intensidad lumínica y el tipo de luz a la que están expuestas las plantas CAM– condicionan el funcionamiento de este metabolismo.

Las plantas constituyen un eslabón primario esencial en el ciclo del carbono en la biosfera. Debe recordarse que, por medio de la fotosíntesis, la mayoría de los organismos autótrofos suministran la materia orgánica utilizable al resto de los seres vivos (heterótrofos). Por eso, la fijación fotosintética de CO_2 constituye uno de los procesos biológicos más relevantes para la vida. El ciclo reductivo de las pentosas-fosfato es la vía general responsable de esta asimilación. Algunas plantas superiores han desarrollado rutas metabólicas auxiliares que les permiten crecer más eficientemente en zonas tropicales (plantas C_4) o desérticas (plantas CAM).

El conocimiento del metabolismo fotosintético de asimilación del carbono permite plantear hipótesis sobre la posibilidad de incrementar el rendimiento de cultivos vegetales. Entre otros, mencionaremos el desarrollo de compuestas que inhiban selectivamente el ciclo C_4. Dado que muchas malezas son plantas C_4, estos productos serían muy útiles como herbicidas en cultivares de especies C_3. Además, la transformación de plantas C_3 en C_4 permitiría obtener especies con mayor productividad. A pesar de que los cambios requeridos para tal fin son muchos y complejos, el hallazgo de especies con características metabólicas intermedias (plantas intermediarias C_3-C_4) y el constante perfeccionamiento de las técnicas de ingeniería genética vegetal hacen cada vez menos remota esta alternativa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BIOCHEMISTRY OF PLANTS. A COMPREHENSIVE TREATISE. Editado por M. D. Hatch y N. K. Boardman. Academic Press, Nueva York, vol. 8, 1981.

C_3, C_4: MECHANISMS, AND CELLULAR AND ENVIRONMENTAL REGULATION OF PHOTOSYNTHESIS. Gerald E. Edwards y David A. Walker. Blackwell, Londres, 1983.

HIGHER PLANT PHOSPHOENOLPYRUVATE CARBOXYLASE. STRUCTURE AND REGULATION. Carlos S. Andreo, Daniel H. González y Alberto A. Iglesias, *FEBS Letters*, vol. 213, n.º 1; págs. 1-8; marzo de 1987.

Taller y laboratorio

Ante un frenazo repentino, ¿qué es más eficaz: bloquear las ruedas o controlar la frenada?

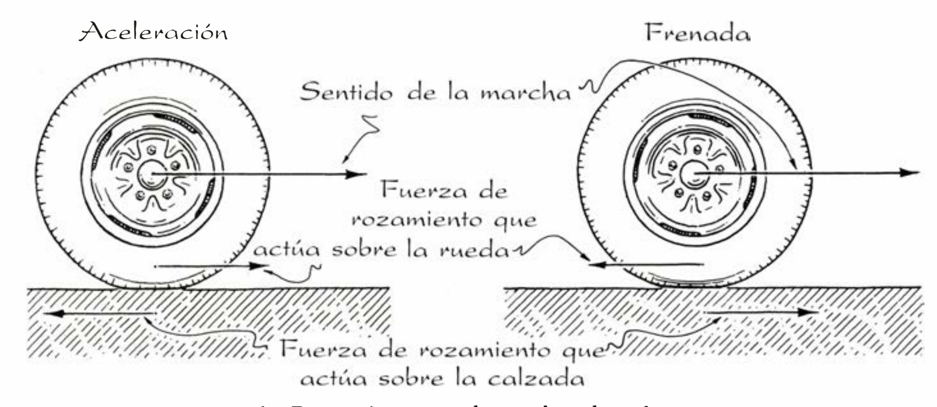
Jearl Walker

Uno de los mayores sustos que podemos llevarnos al conducir es el de vernos en la tesitura de tener que dar un frenazo brusco para evitar un encontronazo. ¿Cómo accionar el freno para conseguir una rápida detención, menos arriesgada? ¿Hay que apretar a fondo el pedal para bloquear las ruedas (o sea, impedir que giren)? ¿O hay que apretarlo firmemente, pero no con tanta fuerza que se "claven" las ruedas? Algunos profesores de autoescuela y ciertos físicos abogan por la primera táctica; varios textos de física defienden la segunda con el mismo vigor. Cierto es que hay automóviles modernos equipados con sistemas de freno controlados por ordenador que ajustan automáticamente la frenada sin bloquear las ruedas. Pero supongamos que nuestro modelo carece de tal sistema: ¿cuál es la táctica a seguir?

Para tomar partido debemos considerar las fuerzas de rozamiento que la calzada ejerce sobre las ruedas. Cuando una rueda gira tranquilamente, sin deslizar, se dice que el rozamiento es estático. La intensidad de la fuerza de rozamiento es igual entonces a la fuerza que la rueda ejerce paralelamente a la calzada. Cuando el movimiento del coche es estacionario y no ejerce fuerza alguna paralelamente a la calzada, no actúa sobre las ruedas ningún rozamiento. Cuando se acelera y el motor actúa sobre las ruedas, haciéndolas girar con más rapidez, las ruedas motrices impulsan entonces la calzada hacia atrás y la calzada impulsa las ruedas hacia adelante. Es precisamente esa fuerza hacia adelante lo que impele el vehículo.

Cuando los frenos aminoran la rotación de las ruedas, éstas empujan hacia adelante y sufren una fuerza de rozamiento hacia atrás, que es la causante de que el vehículo disminuya su velocidad. El límite superior de la fuerza debida al rozamiento estático lo establece el producto de la fuerza vertical hacia abajo que soporta cada rueda por un parámetro de la interacción cubierta-calzada llamado coeficiente de rozamiento estático. En esta fórmula, la fuerza vertical hacia abajo es, por lo general, la parte del peso del automóvil que soporta esa rueda. El coeficiente de rozamiento estático viene a medir las rugosidades a pequeña escala de la cubierta y la calzada. Para una calzada asfaltada, un valor característico puede ser 0,8.

Si la fuerza que sobre una rueda ejerce la calzada excede el límite superior del rozamiento estático, la rueda comienza a deslizar, y se dice que la fuerza de rozamiento sobre la rueda es de rozamiento dinámico. Si se acciona el freno con fuerza, la rueda se bloquea casi al instante. La fuerza de rozamiento apunta hacia la parte trasera del vehículo y su módulo es igual al producto de la fuerza vertical hacia abajo que soporta la rueda por un coeficiente de rozamiento dinámico. Téngase en cuenta que, aunque la intensidad de la fuerza debida al rozamiento estático puede variar desde cero hasta cierto valor máximo, el rozamiento dinámico es siempre el que marca ese producto. (De hecho, en el rozamiento dinámico puede haber una pequeña variación debida a la velocidad con que la rueda resbale sobre la calzada y otros factores.)



1. Rozamientos en la rueda y la calzada

El coeficiente de rozamiento dinámico es menor que el de rozamiento estático. Por ejemplo, cuando la cubierta de un neumático corriente resbala sobre asfalto seco, el coeficiente de rozamiento dinámico puede ser de 0,6. La reducción del rozamiento cuando empieza el deslizamiento es consecuencia de varios factores, siendo el más importante el calor generado al patinar. Cuando la calzada está constituida por materiales bituminosos, y el asfalto es uno de ellos, se funden y dejan la señal de un patinazo. El material de la cubierta puede también fundirse. Cualquiera que sea el caso, el deslizamiento produce una capa fluida entre la rueda y la calzada que lubrica el movimiento y reduce el coeficiente de rozamiento.

Así, pues, en un frenazo imprevisto, ¿hay que bloquear las ruedas o no? Si frenamos fuerte sin bloquear las ruedas, el rozamiento estático sobre éstas puede llegar hasta su límite superior. Pero si bloqueamos las ruedas de modo que comiencen a resbalar, el rozamiento no alcanzará el máximo valor por culpa de la lubricación. En todo caso, el responsable de que el vehículo se detenga es el rozamiento; por eso, la mejor solución parece ser la primera, ya que el rozamiento es mayor y la distancia de parada debe ser menor. Así se afirma en algunos textos de física.

A veces, los conductores expertos discrepan de esta conclusión. Uno al menos aduce que, en una emergencia, no hay tiempo para encontrar el punto óptimo en la aplicación de los frenos que maximice el rozamiento estático sin bloquear las ruedas. El argumento es desde luego acertado: si el conductor ajusta y reajusta la frenada, el tiempo invertido alargará inevitablemente la distancia de parada.

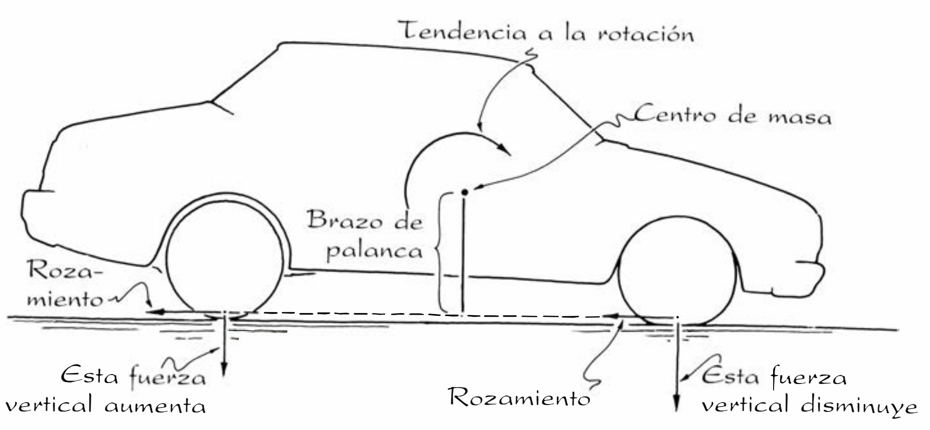
Hagamos caso omiso, a título de suposición, de esa observación práctica. ¿Cómo responder a la pregunta acerca de los procedimientos de frenada? El tema fue abordado en 1979 por Daniel P. Whitmire y Timothy J. Alleman, por entonces en la Universidad de Luisiana suroccidental. Señalaron que, contrariamente a la argumentación que

suele ofrecerse en los textos, los experimentos revelan que la detención con las cuatro ruedas bloqueadas acostumbra a requerir menos espacio que detenerse sin deslizamiento alguno. Su argumento clave es que, durante el frenazo, aparecen sobre el coche unos momentos de giro debidos a las fuerzas de rozamiento que cambian apreciablemente las fuerzas verticales que actúan sobre las ruedas y, en consecuencia, la fuerza de rozamiento.

Siguiendo el hilo de su razonamiento, consideremos un automóvil marchando normalmente al que se aplican los frenos [*véase la figura 2*]. Si no patina ninguna de las ruedas, cada una de éstas experimentará una fuerza de rozamiento estático dirigida hacia atrás que disminuye la velocidad del vehículo. Estas fuerzas crean, asimismo, unos momentos de giro que provocan una rotación en torno a un eje horizontal que pasa por su centro de masa, de tal manera que la parte trasera del vehículo se levanta y el morro se afirma contra el suelo. Para cada rueda, el momento de giro es igual al producto de la fuerza de rozamiento por el brazo de la palanca. Para hallar esta distancia, prolonguemos mentalmente por debajo del automóvil una de las fuerzas de rozamiento. El brazo es un segmento perpendicular a esa prolongación que pasa por el centro de masa. Como el rozamiento tiene lugar a ras de la calzada, la longitud del brazo es la altura del centro de masa. El sentido de la rotación asociada a un momento de giro podemos determinarlo imaginando que la fuerza tiende a girar el brazo en torno al centro de masa.

Durante un frenazo fuerte, la rotación del vehículo puede sentirse si la suspensión es de blandura suficiente: el coche se inclina hacia adelante, aumentando el peso que recae sobre las ruedas delanteras y disminuyendo el que actúa sobre las traseras. Aunque el automóvil fuera rígido, e incapaz, por tanto, de rotar, la propensión al giro produciría el mismo resultado: los momentos de giro disminuirían en algo la fuerza vertical que recae sobre las ruedas posteriores e incrementarían la que recae sobre las anteriores. Por consiguiente, el límite superior del rozamiento estático aumenta en las ruedas anteriores y disminuye en las posteriores con respecto al límite existente antes del frenazo.

Para determinar la influencia de esos cambios en la frenada, Whitmire y Alleman consideraron varias situaciones. A efectos comparativos tomaron el caso clásico en el que se prescinde de



2. Momento de giro debido al rozamiento durante un frenazo

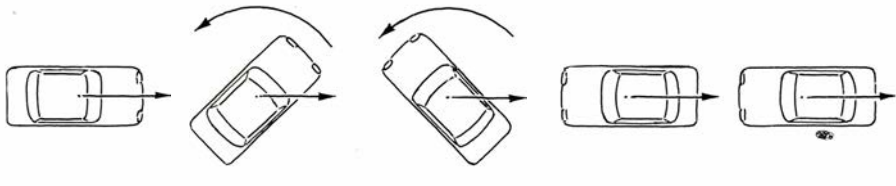
los momentos de giro y se supone que cada rueda está sometida al mismo rozamiento estático, que asume el valor límite superior. Sea D la distancia de parada en tales circunstancias. Abordaron luego la acción de los momentos de giro. Supongamos que los frenos sean idénticos y que al frenar las ruedas traseras estén al borde del deslizamiento. El rozamiento en las ruedas traseras estará en el límite superior en lo que respecta al rozamiento estático, pero ese límite superior lo han rebajado los momentos de giro. Como suponemos que los frenos son idénticos en todas las ruedas, las delanteras deben experimentar un rozamiento de la misma intensidad. Gracias a ese menor rozamiento en todas las ruedas, la distancia de parada podría llegar hasta 1,5D.

Combinar los frenazos así podría llegar a ser menos eficaz para detener un automóvil que patinar con las cuatro ruedas. La distancia de parada para un automóvil cuyas cuatro ruedas patinen no la alteran los momentos de giro, puesto que la reducción del rozamiento en las ruedas traseras queda exactamente compensada con el aumento del rozamiento en las ruedas delanteras, de modo que la suma de los rozamientos equivale a la ausencia de momentos de giro. Como resultado, si el coeficiente de rozamiento dinámico es un 20 por ciento menor que el de rozamiento estático, la distancia de parada para un automóvil que patine totalmente es de 1,25D, la cual puede ser notablemente más favorable que la distancia requerida en una parada controlada.

La distancia de parada con un frenazo controlado puede reducirse si los frenos se aplican con la firmeza apropiada para que las ruedas posteriores se pongan a patinar y las anteriores estén a punto de hacerlo. En ese caso, la combinación de rozamiento estático máximo en las ruedas anteriores (que es elevado a causa de los momentos de giro) y rozamiento dinámico en las posteriores detiene el vehículo en una distancia sólo ligeramente mayor que D y, por tanto, menor que la distancia de parada para un vehículo que patine con las cuatro ruedas.

Los frenos de los automóviles suelen regularse de manera que contrarresten los momentos de giro que crea el rozamiento, de suerte tal que, cuando se aprieta el pedal, los frenos delanteros actúan más enérgicamente que los traseros. Supongamos que los frenos se hayan regulado de manera que las ruedas delanteras se encuentren a punto de patinar al tiempo que las traseras se hallen aún lejos de esa situación. Las ruedas delanteras experimentarán entonces el máximo rozamiento estático, mientras que las traseras puede que sufran sólo un pequeño rozamiento estático, con lo que nuevamente la distancia de parada podrá ser peligrosamente mayor que D, e incluso mayor que la correspondiente a un automóvil al que le patinen las cuatro ruedas.

La situación mejora si los frenos se aplican con fuerza suficiente para que las ruedas delanteras comiencen a patinar y las traseras se encuentren al borde del deslizamiento. Las ruedas delan-



3. Un "trompo"

teras estarán entonces sometidas a rozamiento dinámico, mientras que las traseras experimentarán el máximo rozamiento estático y la distancia de parada será sólo un poco mayor que *D*.

Hay una situación más a considerar. El sistema de frenos puede regularse para que las cuatro ruedas, las anteriores y las posteriores, se encuentren todas a la vez justo a punto de patinar, y todas experimenten el máximo rozamiento estático. Sólo en este caso ideal será *D* la distancia de parada, tal como predicen los cálculos que se ofrecen en los libros de texto. Pero puede ser que ese ajuste carezca de valor real, puesto que depende del coeficiente de rozamiento estático. Pese a que el reglaje de los frenos pueda optimizarse para un tipo de calzada, no sería entonces el óptimo para otro tipo de calzada con la que las cubiertas presentaran un coeficiente de rozamiento distinto. (Ahora se entiende la razón de los sistemas de frenos controlados por ordenador: el reglaje se adapta automáticamente a cualquier tipo de calzada.)

Resumiendo, pues, bloquear las cuatro ruedas y que patinen quizá constituya la mejor táctica en algunos frenazos de emergencia si se trata de minimizar la distancia de parada. El provecho es máximo si los momentos de giro que actúan sobre el vehículo tienden a poner las ruedas traseras en deslizamiento inminente, antes de que las delanteras lleguen a esa situación. Esta táctica, empero, adolece de una grave fisura: si el automóvil se pone a patinar, el fluido lubricante que se forma entre las cubiertas y-la calzada hace que el conductor pierda el control sobre la dirección del vehículo. Y si al comenzar a patinar el coche estaba tomando una curva, es muy posible que derrape y se salga de su carril. El derrape puede producirse si las ruedas no experimentan el mismo rozamiento, o bien si la calzada está inclinada o abombada, como suele ser el caso, para facilitar el desagüe.

La eventualidad de un derrape la investigó en 1984 William G. Unruh, de la Universidad de Columbia Británica, en aquellas situaciones en que sólo deslizan las ruedas delanteras o las traseras. Como acaso el lector ya habrá observado por sí mismo en alguna ocasión, si sólo se bloquean las ruedas delanteras el vehículo suele mantenerse estable en el sentido de que sigue encarado hacia adelante, pero si se bloquean sólo las traseras es probable que derrape, girando hasta encararse hacia atrás de modo que marche por la calzada, pero de espaldas.

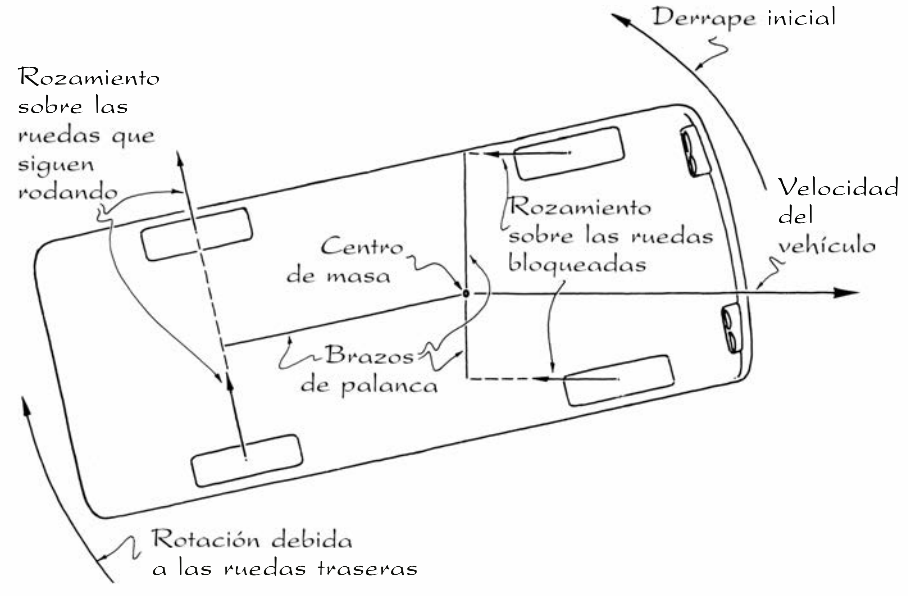
Sigamos una versión simplificada del análisis de Unruh (quien ofreció también una versión mucho más refinada) considerando un automóvil que repentinamente se ponga a derrapar hacia la izquierda [*véase la figura 4*]. Supongamos que hayan quedado bloqueadas las ruedas delanteras y que las traseras sigan rodando. Como el vehículo está derrapando, las ruedas traseras deben deslizarse lateralmente y sufrir una fuerza de rozamiento dinámico paralela al puente trasero. Las ruedas delanteras sufren también un rozamiento dinámico; mas, al estar bloqueadas, las fuerzas correspondientes apuntan directamente hacia atrás, en sentido contrario al de la marcha inicial.

Cada fuerza de rozamiento genera un momento de giro que tiende a girar el vehículo horizontalmente en torno a su centro de masa. Para determinar los momentos de giro, dibujemos una perspectiva en planta del vehículo sin tener en cuenta la altura de su centro de masa sobre la calzada. Seguidamente, para hallar los brazos de palanca asociados a los momentos de giro, tracemos una flecha que represente cada fuerza hasta donde corte a una perpendicular que pase por el centro de masa. La longitud de esa perpendicular es el brazo de la palanca; el sentido de la rotación originada por cada momento puede deducirse imaginando que cada fuerza tiende a hacer girar su brazo en torno al llamado centro de masa.

Cuando el morro del automóvil haya comenzado a derrapar hacia la izquierda, los momentos de giro de las ruedas delanteras, aproximadamente iguales, se cancelan entre sí porque tienen sentidos opuestos el uno al otro, pero los momentos de giro de las ruedas traseras provocan ambos una rotación hacia la derecha que se opone al derrape. Aunque el vehículo gire apreciablemente, hasta el punto de que el momento de giro de la rueda delantera izquierda aumente en virtud de la mayor longitud de su trazo, los momentos de giro debidos al rozamiento en las ruedas traseras seguirán dominando porque sus brazos son más largos, con lo que detendrán el derrape y devolverán por fin el vehículo a la dirección correcta. Por consiguiente, cuando se bloquean únicamente las ruedas delanteras, cualquier rotación fortuita del vehículo la corregirá automáticamente el rozamiento en las ruedas traseras.

Supongamos ahora que sólo quedan bloqueadas las ruedas traseras. Estas sufrirán unas fuerzas de rozamiento dirigidas hacia atrás, mientras que las ruedas delanteras, que siguen rodando, sufrirán unas fuerzas de rozamiento paralelas al puente delantero [*véase la figura 5*]. Al comenzar el derrape, los momentos de giro de las ruedas traseras quedan casi anulados, ya que uno y otro tienden a provocar rotaciones de sentidos contrarios. No ocurre lo mismo con los momentos de giro de las ruedas delanteras; ambos favorecen la rotación a la izquierda, y así el vehículo sigue derrapando. Conforme el coche sigue girando, aumenta el momento de giro de la rueda trasera derecha porque su brazo de palanca se alarga, pero ni siquiera entonces puede contrarrestar los momentos de giro combinados de las ruedas delanteras. En suma, el derrape continúa incontroladamente y el automóvil da una vuelta completa hasta colocarse de espaldas a su sentido original de marcha.

Unruh examinó también de qué modo influía la posición del centro de



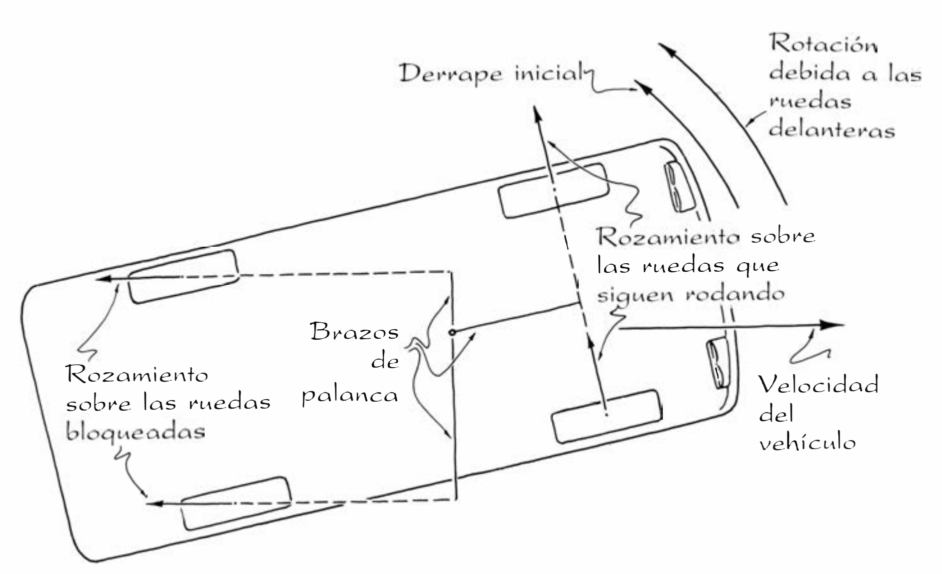
4. Inicio del derrape de un automóvil con las ruedas delanteras bloqueadas

masa del automóvil en una inversión como la descrita. Si el automóvil es de motor delantero, el centro de masa se encuentra adelantado con respecto al centro geométrico del vehículo y sobre las ruedas traseras gravita menos peso que sobre las delanteras. Resultará entonces más probable que las ruedas traseras se bloqueen antes, durante un frenazo, provocando con ello el derrape del automóvil.

Cuando el automóvil es de motor trasero, como el Volkswagen "Escarabajo" que en tiempos poseía Unruh, la estabilidad ante el derrape es mucho mayor. En este caso, el centro de masa se encuentra atrasado con respecto al centro geométrico del vehículo y sobre las ruedas delanteras gravita menos peso que sobre las traseras. Resultará por tanto más probable que las ruedas delanteras se bloqueen primero, pero entonces el derrape lo corregirá enseguida el rozamiento en las ruedas traseras. Algunos automovilistas se las arreglan para asegurarse esta estabilidad, aunque su automóvil sea de motor delantero, cargando la parte posterior del vehículo con sacos de arena u otros objetos pesados. Esta medida podría ayudar a cualquier conductor que se enfrente a la posibilidad de tener que frenar en una calle helada, donde las ruedas traseras se bloquearían con facilidad.

La eventualidad de que un automóvil de motor delantero derrape cuando se bloquean sus ruedas traseras viene condicionada por dos situaciones de partida. Si el vehículo se encuentra repentinamente formando un ángulo con la dirección de marcha deseada, aunque sin derrapar, él mismo comenzará a derrapar sin control si ese ángulo supera cierto valor crítico. Este valor crítico es pequeño incluso para velocidades típicas de la conducción urbana y aún menor para velocidades progresivamente mayores. Pero si el automóvil está inicialmente orientado en la dirección deseada y derrapa un poco a causa de alguna irregularidad de la calzada, por ejemplo, seguirá derrapando si el giro inicial supera cierto valor crítico, no muy elevado. Aquí también la velocidad labora contra el automovilista. En la mayoría de las situaciones reales, el bloqueo de las ruedas traseras provoca casi con seguridad un derrape incontrolable.

La existencia de un ángulo crítico y un derrape inicial crítico guarda relación con el hecho de que las fuerzas de rozamiento no sólo crean momentos de giro sobre el automóvil, sino que, además, disminuyen su velocidad y tienden a cambiar la dirección de marcha. Si no se sobrepasan el ángulo crítico ni el derrape inicial crítico, la acción de las fuerzas se encargará de estabilizar el vehículo. Por ejemplo, si hacemos que el coche vire repentinamente un poco a la izquierda, el rozamiento que entonces actúa en las ruedas delanteras podría acelerar hacia la izquierda el centro de masa, con lo que antes de que el derrape se produzca, se torna a restablecer la dirección del automóvil volviendo a la que tenía originalmente.



5. Inicio del derrape de un automóvil con las ruedas traseras bloqueadas

Podríamos corregir el derrape girando las ruedas delanteras hacia la dirección de marcha deseada; al menos, tal es el consejo que suele darse. Si la velocidad es baja, este ardid puede dar buen resultado aun cuando se giren las ruedas un poco más de lo debido y luego haya que rectificar. Pero si la velocidad es alta, cualquier error en el primer intento hará que el vehículo rote sobrepasando la orientación correcta y derrape sin control en la dirección contraria.

Ninguna de las maniobras de frenado que les he descrito tienen en cuenta un aspecto práctico de las emergencias: el tiempo de reacción. Como un automovilista no puede advertir al momento una situación peligrosa y aplicar los frenos instantáneamente, el vehículo avanzará siempre cierta distancia antes de que comience el frenazo. Algunos textos legales referentes a accidentes de tráfico consignan límites inferiores para los tiempos de reacción. Si el peligro es advertido enseguida y no reclama nada más complicado que frenar, bastará quizá con un cuarto de segundo para percibir el peligro, seguido de otro cuarto de segundo para accionar los frenos. Suponiendo que estemos rodando a 90 kilómetros por hora cuando surja la emergencia, la distancia mínima recorrida tomando como base nuestra reacción ante el peligro y la aplicación completa de los frenos será de unos 13 metros. Por supuesto, si el peligro es difícil de percibir o si estamos distraídos momentáneamente o bajo los efectos del alcohol, la distancia asociada a nuestro tiempo de reacción puede ser mucho más larga.

Aún queda otro factor por estudiar en los frenazos, con el cual ya estamos familiarizados. Es el coeficiente de rozamiento, estático o dinámico, entre los neumáticos y la calzada. Experimentos *ad hoc* han demostrado que el coeficiente varía notablemente en función del tipo de neumático y de su inflado. También varía según el firme de la carretera, su antigüedad y el tráfico que ha soportado. El tráfico denso puede reducir el coeficiente de una carretera de hormigón hasta un 70 por ciento de su valor original, cuando estaba nuevo, y un coeficiente menor aumenta, por supuesto, la distancia de parada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PHYSICS OF TRAFFIC ACCIDENTS. Peter Knight en *Physics Education*, Vol. 10, n.º 1, págs. 30-35; enero, 1975.

EFFECT OF WEIGHT TRANSFER ON A VEHICLE'S STOPPING DISTANCE. Daniel P. Whitmire y Timothy J. Alleman en *American Journal of Physics*, Vol. 47, n.º 1, págs. 89-92; enero, 1979.

AUTOMOBILE STOPPING DISTANCES. L. J. Logue en *The Physics Teacher*, Vol. 17, n.º 5, págs. 318-320; mayo, 1979.

INSTABILITY IN AUTOMOBILE BRAKING. W. G. Unruh en *American Journal of Physics*, Vol. 52, n.º 10, mayo 903-909; octubre, 1984.

TRAFFIC ACCIDENT INVESTIGATOR'S MANUAL FOR POLICE. J. Stannard Baker y Lynn B. Fricke. The Traffic Institute, Northwestern University, 1986.

Juegos de ordenador

Breve excursión por el conjunto de Mandelbrot, a bordo del Mandelbús

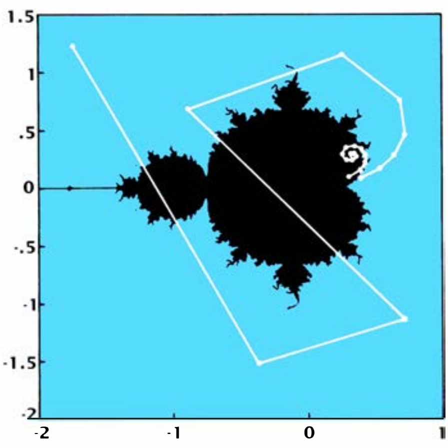
A. K. Dewdney

Solos, por sí, ni el Arte ni la Ciencia:
manifieste tu obra la paciencia;
Recrea pausado el ánimo con calma
Pues nada, sino el tiempo, fortalece el alma.

—JOHANN WOLFGANG VON GOETHE, *Fausto*

Parece como si arte y la ciencia se combinasen en el conjunto de Mandelbrot. Su complejidad asombrosa es exponente del activo campo de estudio en que se ha convertido el caos y la dinámica de los sistemas no lineales; y hasta personas que no tienen la menor idea de la importancia física del conjunto encuentran una extraña belleza en su sombrío interior y en su enjoyado halo. Como nos recuerda la inspirada cita de Goethe, hace falta verdadera paciencia cuando uno se dispone a "cocer" una imagen del conjunto de Mandelbrot. Aunque un ordenador personal se encargue de efectuar los cálculos necesarios, a razón de miles de ellos por segundo, pueden ser necesarias varias horas para que el ordenador entregue una imagen terminada.

El conjunto de Mandelbrot (así llamado en honor de su descubridor, Benoit B. Mandelbrot, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, que tiene IBM en Yorktown Heights, Nueva York) consta de una infinidad no numerable de puntos. Las imágenes del artículo de este mes están construidas determinando qué puntos de una colección mucho más diminuta (apenas unos pocos millares de puntos) pertenecen al conjunto. Cada píxel, cada elemento de imagen de una figura, corresponde a un punto de la colección. Así pues, cada imagen representa una u otra parte del conjunto, amplificada y coloreada según los gustos de los cartógrafos de Mandelbrot que aquí presentamos. Es muy posible que, al observar las fotografías, los lectores se pregunten: ¿qué belleza infatigable late en el corazón del conjunto de Mandelbrot? ¿Qué proceso crea estas formas tan extraordinarias, esta complejidad que cala en las profundidades mismas del infinito? La simplicidad de la respuesta choca frontalmente con la complejidad del conjunto.



1. Dos posibles rutas del Mandelbús

En dos artículos anteriores, he descrito ya con cierto detalle cómo generar con ordenador el conjunto de Mandelbrot [véase INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1985 y enero de 1988]. En esta ocasión deseo asegurarme de que incluso los lectores que sufran de ansiedad matemática aguda logren adquirir cierta comprensión del conjunto. Hay personas a quienes la explicación de que el conjunto de Mandelbrot tiene que ver con "números complejos" las hace empalidecer y murmurar excusas sobre la necesidad urgente de irse a algún sitio. Por fortuna, resulta posible eludir por completo el tema de los números complejos. Invito a los lectores que se den por aludidos (y también a los demás) a acompañarme a un plano imaginario, donde tomaremos el Mandelbús, que nos llevará en un recorrido especial por el conjunto de Mandelbrot.

Lo mismo que los puntos de la superficie terrestre, que pueden ser especificados por su longitud y latitud, también los puntos del plano tienen coordenadas. El punto (0,0), llamado "origen", yace en el centro del plano. De un toque de varita mágica convertiré al lector en un ser inimaginablemente diminuto situado en un punto cuyas coordenadas son (a,b). ¿De qué lugar exacto se trata? Pues de cualquier lugar donde el lector guste encontrarse. Pero una vez tomada la decisión, convendremos en que a y b tendrán valores específicos, tales como −0,43 y 2,78, en cuyo caso el lector se encontraría a 2,78 unidades al norte del origen y 0,43 unidades al este. ¿Cuánto mide una unidad? Poco importa que uno la considere de un kilómetro o de un metro. Después de todo, cualquier distancia parece enorme cuando uno tiene la pequeñez de un punto.

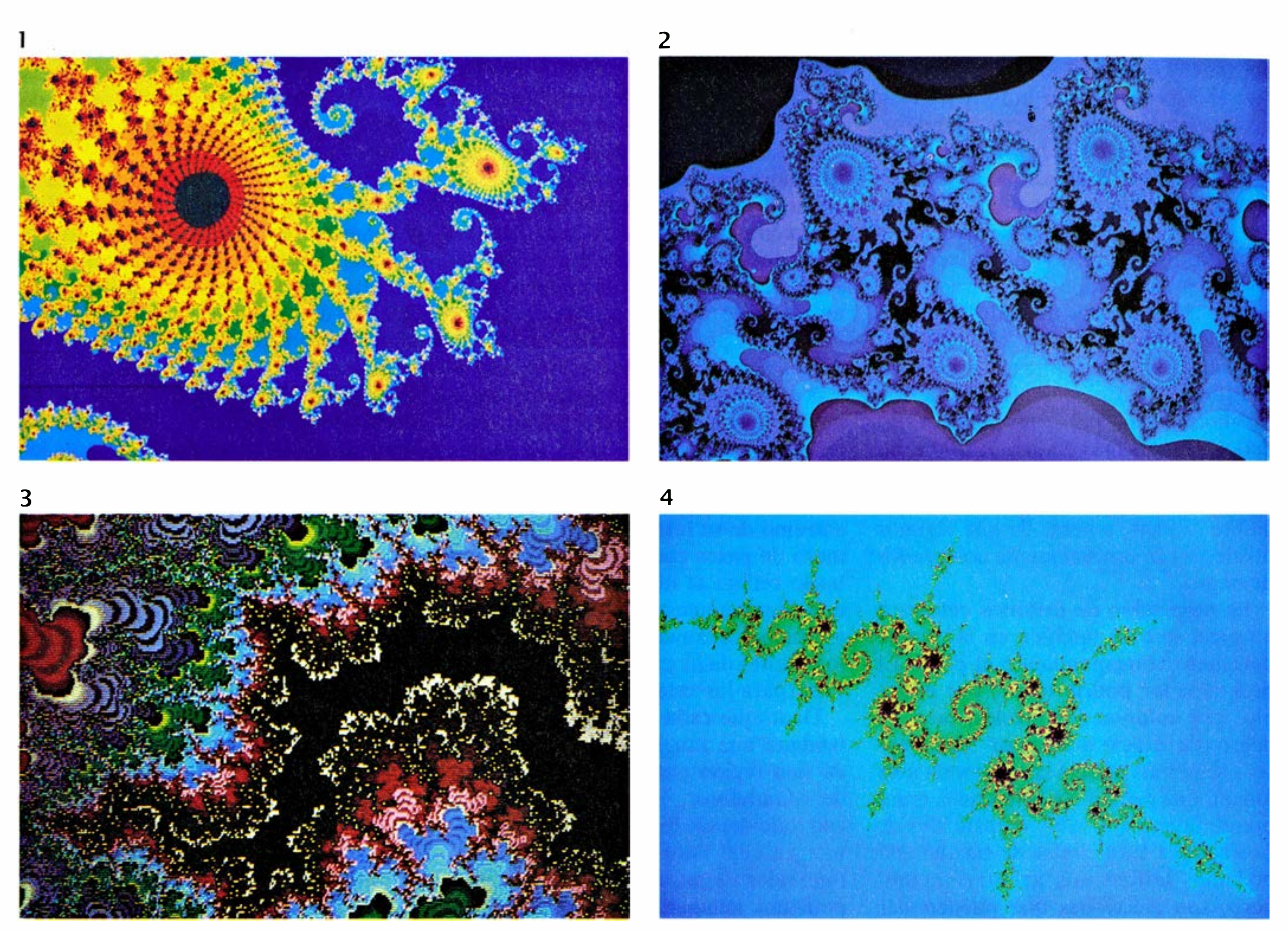
Ahora que el cooperante lector —pequeño y diminuto— se ha aposentado en un punto del plano, está listo para tomar el Mandelbús. Pero antes de que llegue el bus, explicaré su ruta. El bus comienza su viaje en (0,0) y se dirige directamente a (a,b), a recoger al paciente lector, que habrá de hacer su viaje en solitario, pues el Mandelbús no recogerá más lectores en su zigzaguear de un punto a otro, en una sucesión infinita de paradas. Para ser específico, la ruta del Mandelbús está dada por una fórmula relativamente sencilla, que le dice al conductor cuál es el punto que ha de visitar seguidamente, tras detenerse en (x,y). Dicha fórmula es

$$(x,y)^2 + (a,b).$$

¿Qué significa esa fórmula? El término $(x,y)^2$ no es más que una abreviatura del punto cuyas coordenadas son, respectivamente, $x^2 - y^2$ y $2xy$. Sumarle (a,b) a $(x,y)^2$ significa que hay que sumar a a la primera coordenada del cuadrado y b a la segunda. A riesgo de pecar de tedioso, las coordenadas resultantes de estas operaciones aritméticas son por consiguiente $(x^2 - y^2 + a, 2xy + b)$. ¿Dónde cae ese punto? Para determinarlo, se sustituyen en la fórmula las coordenadas x e y de la parada anterior, así como las coordenadas a y b de la primera parada.

El Mandelbús arranca siempre del origen. Desde allí sale disparado hacia el punto (a,b). Para ver que así es, el lector no tiene más que sustituir por 0 las variables x e y en la fórmula anterior. Todos los cuadrados y todos los productos de x e y se anulan, dejando sólo a y b como nuevos valores de las coordenadas. Para ver adónde se dirigirá seguidamente el Mandelbús, bastará sustituir las letras x e y por las coordenadas a y b. Al hacerlo, vemos que el segundo punto de detención es siempre $(a^2 - b^2 + a, 2ab + b)$.

El viaje en el Mandelbús es un continuo vaivén, que nos deja los huesos hechos polvo. Para dar al lector cierta idea de cómo es, en la figura 1 se muestra



2. Una colección de imágenes de Mandelbrot

una vista aérea de dos posibles viajes. En uno de estos casos, el bus sale del origen, se detiene a recoger al lector y visita seguidamente una serie de puntos que parecen contraerse en espiral hacia el punto de partida. En el otro caso, el lector visita una serie de paradas que al principio están muy próximas, pero que gradualmente se van separando más y más, hasta emprender la senda conducente al infinito. No sería mala idea bajar en la primera parada si casualmente nos hallamos en ese viaje concreto.

Aunque los dos viajes sean de carácter diferente, de acuerdo con la fórmula cada uno de ellos estuvo totalmente determinado por la primera parada. En el primer caso, por ejemplo, el lector se sube al Mandelbús en (0,300, 0,100). Sustituyendo estos valores en la fórmula calculamos las coordenadas (0,380, 0,160) de la segunda parada. Para adquirir algo más de confianza en la mecánica de Mandelbrot no sería mala idea proveerse de una calculadora y calcular las coordenadas de la tercera parada, sustituyendo en la fórmula x por 0,380, y por 0,160, a por 0,300 y b por 0,100. Efectuados los cálculos, resulta (0,419, 0,222). Es esta sencilla serie de operaciones aritméticas la que suministra indefinidamente al Mandelbús su fuerza motriz.

Aunque el viaje puede durar tanto cuanto estemos dispuestos a repetir el cálculo, la ruta que verdaderamente siga el Mandelbús puede ser acotada o no acotada. Ello significa que, o bien la sucesión de puntos de parada estará eternamente confinada en cierta zona situada en torno al origen (como en el primer caso), o acabará por escapar de cualquier recinto prefijado y se encaminará hacia el infinito (cual sucede en el segundo caso).

¿En qué consiste, pues, el conjunto de Mandelbrot? Es, sencillamente, el conjunto de todos los puntos (a,b) que dan lugar a rutas acotadas del Mandelbús. Este conjunto determina un sólido continuo situado en medio del plano, pero envía filamentos que penetran en sus alrededores con formas sumamente sutiles y complicadas. Los programas de ordenador que generan imágenes basadas en el conjunto de Mandelbrot determinan el color de cada píxel de la pantalla estableciendo si el Mandelbús sale disparado hacia el infinito desde el punto (a,b) representado por el píxel y, en tal caso, con qué velocidad.

Algunos lectores se encontrarían más cómodos viajando por las rutas acotadas, que parten del interior del conjunto de Mandelbrot; son viajeros a quienes la idea de un viaje al infinito les pone la carne de gallina. Sin embargo, la perspectiva de sólo poder realizar viajes acotados parece deprimir a los matemáticos. Tal vez resida ahí el motivo por el que colorean de negro el conjunto de Mandelbrot.

Es teorema demostrado (y por consiguiente, innegablemente cierto) que si el Mandelbús llega alguna vez hasta un punto situado a dos o más unidades del origen, su destino es inexorablemente el infinito. En tal caso, su primera parada (a,b) yace en el exterior del conjunto de Mandelbrot. Pero, ¿cuántas paradas necesita hacer un Mandelbús con destino al infinito antes de hallarse por lo menos a dos unidades de distancia del origen? Ese número recibe el nombre de estadía de (a,b).

Cuando uno trata de calcular la estadía de (a,b) nunca sabemos del todo en qué momento detener el cómputo. El punto podría dar lugar a 100 o a 1000 paradas antes de decidirse a abandonar la escena definitivamente. Por otra parte, el punto podría muy bien

pertenecer al conjunto, en cuyo caso, por mucho que se espere, el único color que estaría justificado utilizar para su píxel correspondiente sería el negro. En las cercanías de la frontera del conjunto se hallan los puntos que tienen estadías de valores muy altos. Para tales puntos pueden resultar necesarias un millón de iteraciones antes de que el Mandelbús alcance o rebase la distancia crítica de dos unidades desde el origen. Un programa habrá entonces de tomar una decisión más o menos arbitraria acerca de cuándo dejar de iterar la fórmula para un punto (a,b) dado. Límites muy bajos, de 100 e incluso 50 iteraciones, producen imágenes del conjunto hermosas y razonablemente exactas, a pesar de que algunos píxeles serán erróneamente coloreados de negro.

La asignación de distintos colores a un píxel se basa también en la estadía del punto correspondiente al píxel. El programador podría optar, por ejemplo, por colorear los píxeles, bien de negro, de violeta o de color "chartreuse", según los puntos correspondientes tengan una estadía de 100 o más, comprendida entre 50 y 99, o entre 49 y 1. Los colores e intervalos de estadía que podemos utilizar son arbitrarios; empero, son elecciones que pueden dar por resultado figuras de una belleza que corta el aliento (como resulta obvio por la colección de imágenes de las figuras 2, 3 y 4) o provocar un auténtico desastre estético (como supongo que sucederá con mi asignación de colores). La mitad del trabajo del programador consiste en asignar colores a los puntos situados fuera del conjunto; la otra mitad estriba en hallar regiones interesantes del plano, para cartografiarlas. En realidad, cada una de estas tareas se halla influida por la otra, pues es la asignación de colores lo que hace visibles las regiones, que han sido bautizadas con nombres como "valle del caballito de mar" y "al oeste de Finisterre", fantasmagórico lugar poblado por tirabuzones, trasgos y otros genios.

Para llenar toda una pantalla de ordenador de coloreados elementos y no-elementos del conjunto de Mandelbrot es preciso asignar sistemáticamente un valor de a y de b a cada uno de los píxeles de la pantalla, seleccionados en un intervalo dado de valores para a y b. Lo cual podemos realizar mediante dos bucles. Uno de los bucles hace variar a desde uno a otro extremo de su posible gama de valores en 200 pasos iguales, pongamos por caso. El segundo bucle, que contiene al anterior, hace variar b en otros tantos pasos, desde un extremo de su intervalo al otro. El número de pasos correspondiente a cada bucle refleja el número de píxeles de que dispone nuestra pantalla en su dimensión horizontal (correspondiente a los valores de a) y en su dimensión vertical (para los valores de b).

Dado que cada imagen contiene solamente una muestra finita de puntos de una región particular del conjunto de Mandelbrot, jamás podrá ofrecer con todo detalle lo que realmente acontece en ella. Pero tomando para a y b intervalos de variación más estrechos, podemos aumentar el grado de "ampliación". De hecho, el conjunto de Mandelbrot ofrece una fina estructura de detalle a todos los grados de amplificación. Por este motivo, uno de los más populares juegos a que se entregan los entusiastas del Mandelbrot consiste en ampliar áreas del conjunto hasta agotar la capacidad de sus equipos, de la programación de que disponen o la propia paciencia.

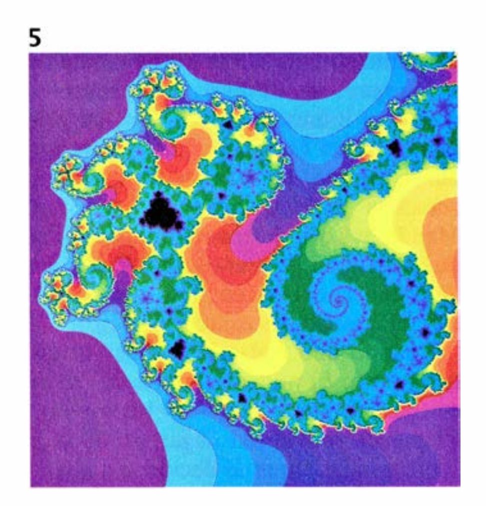
La ampliación de una imagen particular se calcula como sigue. Supongamos computada una imagen de una región cuadrada del plano, cuyo lado tiene una longitud s. La ampliación de la imagen presentada será entonces de $1/s$. Una imagen cuadrada que tenga, por ejemplo, 0,02 unidades de lado contará con una ampliación de 50 al ser proyectada en la pantalla.

Yo mismo siento no pocas veces la tentación de subirme en el Mandelbús y conmutar el control de automático a manual. Sería efectivamente una gran aventura poder guiarlo e ir subiendo por uno de los filamentos del conjunto, en un auténtico viaje de turismo. Así, lejos incluso del cuerpo principal, podremos descubrir copias en miniatura del conjunto, que dan la impresión de flotar aisladas en el plano. Según los matemáticos, el conjunto de Mandelbrot entero es, en realidad, conexo, por lo que cabría guiar el Mandelbús hasta uno de los ejemplares de "mini-Mandelbrot". Pero la carretera que conduce a ellos no se parece en nada a nuestras carreteras. Al ampliar reiteradamente uno cualquiera de los filamentos que rodean al conjunto de Mandelbrot, lo único que se encuentra es una serie de diminutas islitas negras, que dan la impresión de hallarse sueltas. A mayores, entre las islas más grandes vemos otras más pequeñas, pero raramente, si alguna, llega a presentársenos entre ellas una carretera continua.

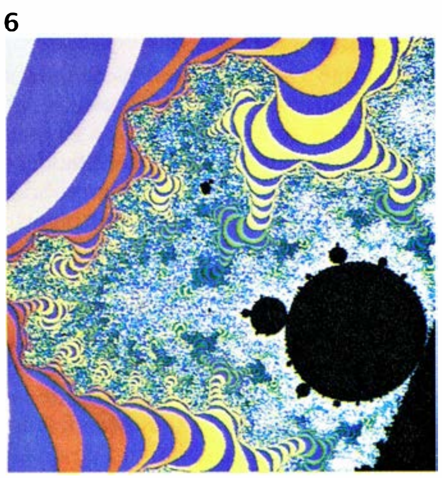
Y ahora cederé la palabra a algunos lectores que tras largas horas de exploración y de ajuste fino de sintonía estética han creado rendiciones ejemplares del conjunto. Walter S. Strickler, de Boulder, Colorado, ha proporcionado la imagen 1. Esta imagen, a la que denomina "pavo real", fue creada con un programa que preparó para su ordenador, un Amiga. Los valores de a en la imagen oscilan desde $-0,750$ hasta $-0,746$, y los de b, desde 0,0986 hasta 0,1014. Podemos calcular la ampliación de la imagen de Strickler mediante la sencilla fórmula que mencioné anteriormente. El menor de los dos lados de la región rectangular cubierta por la imagen tiene una longitud de 0,0028. El recíproco de este número (1/0,0028) proporciona una ampliación aproximada de 357.

Las imágenes 2 a 4 son en realidad un beneficio marginal de mi suscripción a la revista *Amygdala*, un boletín de noticias publicado por Rollo Silver, en San Cristóbal, Nuevo México. (Es posible suscribirse a la revista, o recibir el juego completo de imágenes en transparencias, escribiéndole a Silver, Box 219, San Cristóbal, N. Méx., 87564. Silver pide a sus corresponsales que acompañen sus cartas de un sobre dirigido a sí mismos, debidamente franqueado.)

5



6



3. Un cetro (izquierda) *y un "mini-Mandelbrot"* (derecha)

La imagen 2, generada por John Dewey Jones, de Burnaby, Columbia Británica, exhibe una porción amplificada de la cola de un "caballito de mar". Los caballitos de mar acompañan a los mini-Mandelbrot que revisten la profunda hendidura que separa el cuerpo oriental de la cabeza occidental del conjunto de Mandelbrot. Cualquiera de los caballitos de mar producirá imágenes como éstas si atinamos a elegir correctamente la ampliación y los colores.

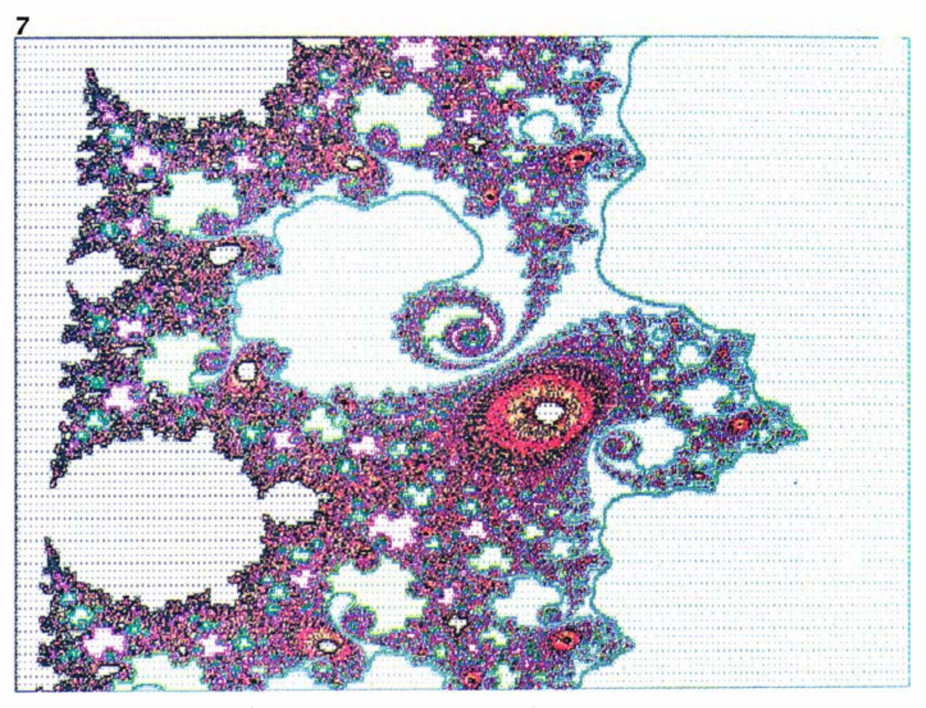
La imagen 3 ha sido bautizada "canal del amor" por su autor, Andrew LaMance, de Wartburg. Presumo que el nombre alude a cierto infame y polucionado lugar próximo a las cataratas del Niágara. De hecho, el negro con que suele colorearse el conjunto de Mandelbrot hace pensar en una fosa séptica saturada de productos químicos tóxicos, en cuyas orillas lucha por sobrevivir una extraña vegetación. Esta imagen tiene su centro en (0,235125, 0,82722), y la ampliación resulta alcanzar la formidable cifra de 24.800.

Ken Philip, de Fairbanks, Alaska, otro de los colaboradores de *Amygdala*, logró la muy notable amplificación de 54.000 en la imagen 4, que exhibe uno de los pequeños cetros situados cerca de los caballitos de mar. Los lectores que deseen explorar este regio dominio han de estar preparados para una computación enérgica: el centro de esta imagen concreta se encuentra en (−1,26446153, 0,04396696).

Michael Adler se sirvió de una red de ordenadores del servicio Apollo R&D, en Chelmsford, para calcular los ornamentales espirilos de la imagen 5. Los lectores que aspiren a reproducir esta porción del conjunto de Mandelbrot han de representar gráficamente puntos de color correspondientes a unos valores de a y b que oscilan, respectivamente, entre 0,31186 y 0,31458 y entre 0,75322 y 0,75594. No se requiere una red informática para generar tal imagen (que tiene una amplificación de 368), a no ser que se necesite disponer de la imagen en menos de un segundo.

La imagen 6 fue generada por R. Terry Sproat, y fotografiada por Rick McCauley, de San Francisco. La imagen muestra uno de los mini-Mandelbrot que germinan a lo largo de los costados del conjunto padre. En este caso, la ampliación es de 20.

Las imágenes obtenidas representando sobre papel porciones del conjunto de Mandelbrot pueden resultar tan atractivas como las que puedan obtenerse sobre la pantalla. En la imagen 7, James L. Crum, un gemólogo de Louisville, ha representado gráficamente una encantadora disposición de rubíes, esmeraldas, amatistas y otras gemas que nos dan indicación de los tesoros que oculta el conjunto de Mandelbrot en una zona no lejana de la cubierta por la imagen de Sproat. En este caso, sin embargo, Crum ha optado por no colorear de negro los elementos de conjunto propiamente dicho; a la mano derecha de la imagen, un miniconjunto de Mandelbrot luce rayas grises.



4. Enjoyada representación gráfica de James L. Crum

Son muchas las formas en que los aficionados pueden hoy producir imágenes como éstas mucho más rápidamente de lo que en tiempos fuera posible en ordenadores personales. Podemos, por ejemplo, servirnos del algoritmo de Mariani, al que así nombramos por Rico Mariani, su creador, que trabajaba como programador del Centro de Ciencias de Ontario, en Toronto. La idea esencial del algoritmo es sencilla: si se determina que los píxeles que contornean una región cuadrada han de ser todos negros (es decir, si se determina que sus correspondientes miembros son todos ellos elementos del conjunto de Mandelbrot), entonces todos los píxeles de la región por ellos encerrada también serán negros. Otro algoritmo rápido es el descrito por Uwal Fisher en un maravilloso libro, *The Science of Fractal Images*, dirigido por Heinz-Otto Peitgen y su colega Dietmar Saupe, de la Universidad de Bremen. La velocidad de ejecución del algoritmo le viene del hecho de que no computa puntos situados en el conjunto de Mandelbrot. En lugar de eso, divide la región situada en el exterior del conjunto en miles de discos de tamaño variable y confina sus cómputos estrictamente a estas regiones circulares.

He de mencionar, pensando en quienes carecen de tiempo o inclinación para explorar el conjunto de Mandelbrot con su propia máquina, que existe una cinta de vídeo titulada *Nothing but Zooms*, producida por ART MATRIX, una pequeña compañía de Ithaca, N. Y. Contiene la más increíble imaginería fractal, producida a un costo de más de 40.000 dólares de tiempo de ordenador en el Centro Nacional de Superordenadores de Cornell. Los lectores pueden hacerse con la cinta escribiendo a ART MATRIX, P. O. Box 880-I, Ithaca, N. Y. 14851.

En el artículo de diciembre, dedicado a la criptología, que es la ciencia de crear y hacer saltar claves, se afirmaba que lo que una persona (o máquina) puede cifrar, otra lo puede descifrar. Existe en realidad una conocida excepción a esa tesis, pero no disponía entonces de espacio suficiente para explicarla. Un mensaje en texto llano (esto es, no cifrado) que me dirigió John C. Shuey me recordó el "bloc de usar y tirar". Una versión sencilla de este sistema de codificación se funda en una serie de enteros aleatorios comprendidos entre 0 y 25, que permiten codificar cada uno de los caracteres alfabéticos de una ristra de caracteres de un mensaje en texto llano: el i-ésimo carácter de la ristra-mensaje se codifica desplazándolo n lugares a lo largo del alfabeto, siendo n el i-ésimo entero aleatorio de la serie de codificación.

Los criptógrafos llaman "blocs" a ta-

les ristras de enteros aleatorios; se dice que es "de usar y tirar" porque se desecha en cuanto es utilizado una vez. Como es obvio, el destinatario del texto cifrado (el mensaje codificado) ha de disponer también de una copia del "bloc". El código así generado es demostrablemente imposible de fracturar, porque el texto cifrado resultante no ofrece ni la más mínima regularidad de la que el criptanalista pueda sacar partido. El propio Shuey genera blocs de usar y tirar a partir de la representación interna de los caracteres.

Según John R. Michener, de Princeton, existen algoritmos de codificación francamente sencillos —aparte de los blocs de uso único— que no sólo pueden hacerse funcionar en ordenadores domésticos, sino que resultan extraordinariamente difíciles de descerrajar. Tales algoritmos se fundan en la remoción de redundancias de los mensajes, comprimiéndolos hasta la mínima secuencia de bits posible. El mensaje comprimido es reordenado mediante una transposición y sustitución de sus bits. Michener, que es autor de varios artículos técnicos sobre criptología, sostiene que tal código sería "excesivamente refinado para que los criptógrafos aficionados (e incluso los profesionales, si el diseñador del código es lo suficientemente hábil y cuidadoso) tengan la menor posibilidad de fracturarlo".

Varios lectores me dieron aviso de un par de importantes publicaciones profesionales que podrían ser de interés para los lectores. Es la primera un libro llamado *Machine Cryptography and Modern Cryptanalysis*, de Cipher A. Deavours y Louis Kruh. La segunda publicación es una revista trimestral, *Cryptologia*, dirigida por Kruh. Los lectores interesados pueden suscribirse escribiendo a Kruh, 17 Alfred Road West, Merrick, N. Y. 11566.

Y ya que estoy tratando el tema de las publicaciones, debería mencionar también *REC*, boletín de noticias dedicado a rompecabezas y retos mentales. *REC* (Recreational and Educational Computing) está editada por Michael W. Ecker, 129 Carol Drive, Clarks Summit, Pa. 18411; enviará un ejemplar de muestra a los interesados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE BEAUTY OF FRACTALS. H. O. Peitgen y P. H. Richter. Springer-Verlag, 1986.

CHAOS: MAKING A NEW SCIENCE. James Gleick, Viking Penguin, Inc., 1987.

THE SCIENCE OF FRACTAL IMAGES. Editado por Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe. Springer-Verlag, 1988.

Libros

Lastanosa, epistemología evolutiva, neuroquímica y cartografía cerebral

Nicolás García Tapia, Mariano Artigas, Francesc Artigas y Luis Alonso

UN AUTOR ARAGONÉS PARA "LOS VEINTIÚN LIBROS DE LOS INGENIOS Y DE LAS MÁQUINAS", por J. A. Frago Gracia y J. A. García-Diego. Diputación General de Aragón; Zaragoza, 1988.

Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas es el título con el que se conoce un importante manuscrito conservado en la Biblioteca Nacional y atribuido hasta hace poco a Juanelo Turriano, famoso relojero e ingeniero de Carlos V y de Felipe II. Hasta 1983 no fue editado, y ello gracias a los desvelos del gran ingeniero e historiador de la técnica José Antonio García-Diego, por medio del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. García-Diego hizo además la introducción del manuscrito, donde demostró que el autor no podía ser Juanelo Turriano.

A pesar de sus meritorios esfuerzos, García-Diego no pudo llegar a determinar quién era el verdadero autor del manuscrito, cosa comprensible si se tiene en cuenta los pocos datos que hasta entonces se tenían de la historia de la técnica española. Ningún aragonés conocido parecía responder a las cualidades de un sabio científico y técnico que además –como se comprobaba en el manuscrito– conocía muy bien Italia y otras partes del mundo.

En un encomiable esfuerzo por encontrar algo más sobre el misterioso autor de *Los veintiún libros...*, García-Diego acudió a distintos especialistas, entre ellos a Juan A. Frago, eminente filólogo que se prestó a la realización del trabajo, cuyo fruto es el libro que comentamos.

Ante todo hay que resaltar la magnífica labor científica llevada a cabo por el profesor Frago, quien analiza la incidencia del italiano y del aragonés en la forma de escribir del autor del manuscrito, su grafémica y fonética, morfología y sintaxis del castellano empleado. Su estudio filológico, aunque pueda discutirse en algún punto, no admite réplica posible en sus conclusiones, como señaló Manuel Alvar. Son estas consideraciones las que justificarían por sí mismas el libro, pues, gracias a ellas, sabemos que el que escribió el manuscrito fue un único autor aragonés, con mucha probabilidad oriundo del tercio nororiental de la provincia de Huesca (aproximadamente la cuenca del río Cinca). Su nacimiento se situaría a principios del siglo XVI, debido a los términos lingüísticos empleados. Por otra parte, el manuscrito de la Biblioteca Nacional parece ser una copia de uno anterior, que el autor no tuvo oportunidad de corregir.

Hasta aquí el libro sólo merece elogios, pues no cabe duda de que los autores han hecho una gran contribución al conocimiento de este gran manuscrito de ciencia y tecnología, sin duda el más importante escrito en lo referente a la especialidad de hidráulica, hasta el siglo XVIII.

Sin embargo, el libro que comentamos cambia a partir de la página 90, en la que se comienza a discutir el problema de la autoría, desviándose del anterior estudio filológico. Sin aportar nuevos datos documentales, se cuestiona la autoría del aragonés Pedro Juan de Lastanosa, olvidando que éste es un hecho objetivo y por consiguiente no expuesto a opiniones personales. Las pruebas documentales a favor de Lastanosa son claras y corresponden a cédulas reales, patentes de privilegio por invención y escritos e inventarios ante escribano público, que, por distintas vías, llegan a un resultado incuestionable: Pedro Juan de Lastanosa es el autor de *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. Sobran, pues, las disquisiciones de los últimos capítulos del libro.

En primer lugar, los autores atribuyen las pruebas documentales a "coincidencias fortuitas". Si se incluye la "coincidencia" de que Pedro Juan de Lastanosa nació en el estrecho límite lingüístico fijado por los autores, y en los mismos años, junto con otras "casualidades", se tienen al menos ocho coincidencias, con lo que se produce una probabilidad de identidad con el autor que en términos estadísticos es superior al 99,9952 por ciento. Pero es que además, en la mayor parte de los casos, no se trata de simples coincidencias, sino de documentos históricos irrefutables.

Es evidente, pues, que en los razonamientos en contra de la autoría de Lastanosa hay unos fallos que vamos a poner brevemente de manifiesto, con la única intención de evitar la lógica desorientación de los lectores y sin ánimo de juzgar a los autores del libro que merecen el máximo respeto en su labor, altamente meritoria.

En primer lugar, se dice que el manuscrito fue escrito a finales del siglo XVI o principios del XVII (no se precisa), por consiguiente, cuando ya había muerto Lastanosa († 1576); esta afirmación se basa en estudios paleográficos y de indumentaria. Pero, por una parte, es bien sabida la imprecisión de la datación de una letra que se sitúa en la evolución de la cortesana a la humanística y, por otra parte, no aparecen en el manuscrito ni las amplias gorgueras ni los gregüescos acampanados hasta la rodilla que caracterizaron la transición del siglo XVI al XVII. Además, como se desprende del estudio filológico, el manuscrito conservado en la Biblioteca Nacional es copia de otro anterior, lo que invalida estas dataciones; documentalmente se demuestra que Lastanosa dejó inacabado el manuscrito a su muerte (lo que explica que no lo firmara), y quedó guardado hasta 1584, año a partir del cual pudo realizarse la copia. Los propios hechos históricos relatados en *Los veintiún libros...* revelan que las fechas límites 1564-1575 para el primer borrador son incuestionables y coinciden con las del servicio de Lastanosa en la corte como maquinario y encargado de escribir el libro sobre ingenios y máquinas.

Se hace la objeción de que el autor no conocía los molinos de viento y no podía haber estado en Flandes, descartando así a Lastanosa. Si fuese así, el autor no podía haber estado en ninguna parte porque en todas había molinos

de viento. Además, no debe olvidarse que se trata de un manuscrito sobre hidráulica, donde no tienen cabida los molinos de viento, y el que se describe (no los otros) se hace porque se parece a los hidráulicos y éste sí se encontraba en Flandes, pero no en Italia ni en España, como acertadamente dice el autor. La misma observación cabe hacer de los relojes, ya que ni se trata de un manuscrito de relojería, ni su autor es un relojero.

El resto de las objeciones son subjetivas, como honestamente se confiesa en el libro que comento. Así, al segundo de los autores le parece que el estilo de *Los veintiún libros...* es diferente de otros escritos de Lastanosa, lo cual es raro cuando el estudio filológico no revela esta diferencia; la prueba de esta subjetividad es que, en el propio libro que comentamos, se dice que parecen de diferente estilo dos escritos firmados por Lastanosa.

También es opinable que parezca que el autor de *Los veintiún libros...* no sabía matemáticas, mientras que Lastanosa –se dice– era un gran matemático, basándose simplemente en que había traducido del latín, en cooperación, un libro de geometría práctica. Lastanosa no era oficialmente matemático real (en contra de lo que se dice), aunque nadie niega que entendía de geometría, lo que es diferente de ser un gran matemático. Se dice que hay errores en las demostraciones matemáticas y por consiguiente el autor era ignorante en la materia. Entonces, por este mismo razonamiento, eran ignorantes Leonardo da Vinci, Galileo y hasta Newton, que también se confundieron. Por otra parte si –como dice López Piñero– hay, anticipándose a otros, cálculos de rendimientos de máquinas ¿cómo se hicieron sin saber matemáticas? Las mismas consideraciones pueden hacerse respecto a la afirmación de que "un universitario jamás comete errores en la lengua", tan radical que cae por su base; máxime si se tiene en cuenta que se trata de una copia que el autor no tuvo oportunidad de corregir.

Se opina, sin base documental, que el autor no era "funcionario", ni pertenecía a la nobleza. Dada la organización estamental de la época era pues de baja extracción. ¿Por qué entonces habla en el manuscrito del "vulgo" de forma despectiva? Si no era "funcionario", ¿cómo sabía los entresijos de la corte y estaba al corriente de secretos como el de los Alfaques? ¿Cómo podía trabajar por su cuenta y sacar tiempo y dinero para escribir un libro tan extenso? Demasiadas interrogantes sin respuesta en un libro que se pretende científico.

Se dedican varias páginas a demostrar que Lastanosa sabía latín, lo que nadie pone en duda, sobre todo en una época en que esta lengua la conocían todos los que poseían cierta cultura. Pero sólo se emplean unas pocas líneas para "demostrar" que el autor del manuscrito no lo sabía, ya "que apenas hay frases en latín". Prescindiendo de la erudición demostrada por el autor de *Los veintiún libros...* en sus citas de autores grecolatinos, ¿qué ocurriría si aplicásemos tal razonamiento a todos los autores que sólo escriben en castellano? Resultaría que nuestros grandes clásicos no sabían latín.

Con tales razonamientos (y otros similares) no es extraño que se llegue en el libro a conclusiones contradictorias: por ejemplo, ¿cómo aceptar que el autor de un manuscrito de tal altura científica y con tantos datos eruditos sea un "simple constructor práctico, de baja extracción social, inculto e ignorante del latín y de las matemáticas"? Otras contradicciones pintorescas derivan de la errónea datación del manuscrito: según las conjeturas del libro, el autor sería un hombre maduro, menor de sesenta años; ahora bien, el estudio filológico revela que nació a principios del siglo XVI y, según se hace la datación, lo escribiría entre finales de ese siglo y principios del XVII; es decir, el autor tendría al redactarlo unos cien años... Creo que deberían cuidarse estos detalles para evitar meter en un callejón sin salida a aquellos investigadores a los que se les anima a buscar en archivos partiendo de tan contradictorios datos.

No quiero que los aspectos negativos que he señalado empañen el conjunto de las aportaciones del libro. He de advertir que están en prensa trabajos que aclaran definitivamente estas cuestiones, de forma documentada, única vía posible para comprobar los hechos históricos. Mientras tanto, recomiendo la lectura atenta de este libro, interesante por muchos aspectos, pero sin perder de vista que el autor aragonés ya está encontrado y tiene un nombre: Pedro Juan de Lastanosa. (N. G. T.)

EVOLUTIONARY EPISTEMOLOGY, RATIONALITY, AND THE SOCIOLOGY OF KNOWLEDGE, editado por Gerard Radnitzky y W. W. Bartley III. Open Court; La Salle, 1987.

Se trata de una compilación de 18 estudios en torno a la epistemología evolucionista (en adelante, EE): 6 de ellos son reimpresiones, 7 son nuevas versiones de trabajos conocidos y 5 se publican por primera vez. Consta de tres partes que corresponden a los tres conceptos expresados en su título.

La primera parte, de 193 páginas (casi la mitad del volumen), está dedicada a las ideas centrales de la EE, que se presenta con la pretensión de ser una perspectiva revolucionaria en la epistemología (de algún modo, la más importante desde el siglo XVIII). Existe ya una abundante bibliografía sobre el tema, tanto favorable como crítica. Esta parte recoge cuatro escritos de Karl Popper y Donald Campbell, ya publicados anteriormente, que proporcionan los fundamentos de la EE; uno nuevo, de W. W. Bartley, quien contrapone las perspectivas epistemológicas centradas en la biología y en la física, defendiendo la primera; una nueva versión de un trabajo de Günter Wächtershäuser acerca de los orígenes de la percepción sensorial; un breve comentario de Rosaria Egidi sobre la emergencia evolutiva, y una respuesta de Gerhard Vollmer a las acusaciones de circularidad que se han lanzado contra la EE.

La idea central de la EE consiste en abordar los problemas de la teoría del conocimiento bajo la perspectiva de la evolución biológica. Sus antecedentes se encuentran en los trabajos de Konrad Lorenz publicados en 1941 y 1943. Lorenz recogió la teoría kantiana de las formas y categorías *a priori* como condición de posibilidad de la experiencia, e intentó explicar cómo surgen esas estructuras en el proceso evolutivo de mutación, selección y adaptación. Afirmó que todos los vivientes poseen estructuras innatas de conocimiento, que son un resultado del proceso evolutivo y actúan como disposiciones heredadas que hacen posible la utilización de información y la adaptación. Como las estructuras kantianas, serían condiciones *a priori* del conocimiento; sin embargo, al ser productos de la evolución, no serían inmutables sino cambiantes. Además, el proceso evolutivo viene equiparado al proceso de aumento del conocimiento, en cuanto que en ambos casos se trataría de la aparición de nuevas entindades sometidas a selección, eliminación y adaptación: en el proceso evolutivo, las novedades son los organismos, mientras que en el aumento del conocimiento esas novedades son las teorías. Los dos procesos seguirían el camino común de formulación tentativa y selección adaptativa.

Tal concepción es muy semejante al esquema básico de "ensayo y elimina-

ción de error" utilizado por Karl Popper. Campbell desarrolló ese esquema desde una perspectiva biológica en 1974. Las ideas de Lorenz, Popper y Campbell han sido sistematizadas por Gerhard Vollmer desde 1975. El resultado es una perspectiva en la cual, como subraya Bartley, la epistemología se desplaza desde enfoques casi exclusivamente centrados en la física hacia otros en los que la biología ocupa un lugar central.

Esta primera parte resultará familiar para quienes ya estuvieran al tanto de los trabajos de Popper, Campbell, Bartley y Vollmer. Resulta interesante la defensa de la EE que Vollmer expone con estilo directo y desenfadado. Hubiera sido deseable que se dedicara más atención al tema de la emergencia, que es capital para la EE. En efecto, si la EE intenta explicar la validez del conocimiento recurriendo a la génesis evolutiva, tal explicación quedará en una declaración de intenciones a menos que se fundamente la emergencia de los nuevos niveles de conocimiento. Debe reconocerse que se trata de una empresa ardua. En particular, la naturaleza de las capacidades singulares del hombre parece desafiar las explicaciones que se limitan a los procesos evolutivos. El tema de la emergencia es tratado en el ensayo de Egidi, que sólo tiene cuatro páginas y además, como advierte la autora, se centra en el aspecto metodológico y deja de lado el ontológico. Popper intenta explicar la emergencia de la mente humana, pero, según él avisa, debe contentarse con formular conjeturas muy especulativas que resultan insuficientes. Me parece que la EE se mueve en un nivel principalmente metodológico y que, si se desea formular una teoría rigurosa del conocimiento, es indispensable plantear cuestiones ontológicas más profundas.

La segunda parte, de 136 páginas, se centra en torno al racionalismo crítico de la escuela popperiana, que es uno de los pilares de la EE. El popperianismo se ha presentado desde sus comienzos como una epistemología crítica o no-justificacionista, afirmando que es imposible encontrar bases firmes para justificar la verdad y que, sin embargo, la actitud crítica permite fundamentar el progreso del conocimiento. Como es natural, esta postura plantea el grave problema de su propia validez: ¿qué sentido tiene afirmar que todo conocimiento es hipotético si esta afirmación se toma como cierta?, ¿cómo es posible detectar críticamente errores si nunca puede afirmarse la verdad de los enunciados concretos? Se trata de interrogantes que gravitan desde hace varias décadas sobre la epistemología popperiana.

Los estudios recogidos en la segunda parte se sitúan en esas coordenadas. Una introducción de W. W. Bartley las concreta aún más: se trata de discutir su propuesta, formulada por vez primera en 1962 y reformulada en años sucesivos bajo los nombres de racionalismo crítico comprehensivo y de racionalismo pancrítico. Se reproducen dos ensayos publicados por John F. Post en 1970 y 1971, en los que se critica la propuesta de Bartley; se publica una nueva versión de un escrito de John Watkins, quien representa el popperianismo ortodoxo de la London School of Economics, y tampoco está de acuerdo con Bartley; y se añade un estudio de Gerard Radnitzky, popperiano continental, favorable al racionalismo pancrítico. Bartley presenta su perspectiva como una interpretación, corrección y generalización de las ideas de Popper. En definitiva, se intenta analizar la consistencia del planteamiento popperiano en la versión de Bartley, quien reconoce que la mayoría de los filósofos, también en la actualidad, sostienen posiciones que difieren del racionalismo crítico. Esto resulta comprensible si se tiene en cuenta que, de modo análogo a lo que sucede con la EE, el popperianismo subraya con pleno acierto algunos enfoques de tipo metodológico, pero no considera o trata de modo unilateral no pocos aspectos de la filosofía general.

La tercera parte, de 106 páginas, se centra en torno a las relaciones entre la racionalidad y la sociología del conocimiento. Contiene la reproducción de un estudio de Peter Munz, y dos nuevos escritos de Anthony Flew y W. W. Bartley.

Es posible distinguir en la formulación actual de la EE tres niveles. El primero es una perspectiva epistemológica que, en palabras de Bartley, es "realista, indeterminista, deductivista, anti-instrumentalista, antipositivista y anti-justificacionista, y también propugna interpretaciones objetivistas de la probabilidad" (p. 9). Coincide básicamente con la epistemología de Karl Popper. Me parece que proporciona instrumentos valiosos para el análisis epistemológico y que, sin embargo, plantea serias dificultades si se pretende construir sobre esa base una entera filosofía.

En un segundo nivel, la EE intenta fundamentarse sobre bases biológicas, constituyéndose como una meta-teoría que utiliza bases empíricas. El intento parece válido si se considera como una aproximación parcial. Hay indicios de que se pretende algo más. Vollmer concluye su contribución con esta frase: "Después de todo, la ciencia es filosofía con nuevos medios" (p. 200). Esto significa que la ciencia permite resolver problemas, que antes se consideraban filosóficos, acerca de la validez del conocimiento. Ello puede ser cierto en algunos casos, pero Vollmer parece otorgar a su afirmación un sentido demasiado general.

Las dificultades se presentan, en efecto, cuando las cuestiones se sitúan en el tercer nivel, o sea, cuando la EE se presenta como una filosofía general. ¿Qué sentido tiene, por ejemplo, hablar de un "realismo hipotético", y cómo puede evitarse una sensación de desconcierto cuando se insiste reiteradamente en el carácter hipotético de todo conocimiento? Vollmer argumenta brillantemente acerca de estos puntos al examinar las acusaciones de circularidad que se han formulado contra la EE. Pero este tipo de cuestiones, que están en la base de la EE, parecen necesitar aclaraciones filosóficas más consistentes.

Radnitzky y Bartley han conseguido una obra que resulta útil para los interesados en los temas abordados por la EE y el racionalismo crítico. Los estudios reunidos en ella son el producto de amplios contactos entre los autores a lo largo de varios años, y tienen la calidad necesaria para cumplir de modo satisfactorio el objetivo que se han propuesto los editores. Las reservas que he mencionado tienen aspectos semánticos susceptibles de aclaración que, posiblemente, disiparían bastantes dificultades. Mi colaboración personal con Radnitzky, que se ha extendido a no pocos aspectos centrales de la epistemología en los que estamos de acuerdo, así me lo ha demostrado (M. A.)

FUNDAMENTOS DE NEUROQUÍMICA, por H. F. Bradford. Editorial Labor; Barcelona, 1988.

A pesar de haber contado nuestro país con la figura máxima de la neurología, Santiago Ramón y Cajal, el conjunto de disciplinas que llamamos en plural neurociencias se halla mal atendido en los curricula académicos de las carreras universitarias, no obstante constituir la base sobre la que se asientan la psiquiatría, parte importante de la farmacología y otras disciplinas de las ciencias médicas y biológicas. Es superfluo resaltar la importancia del sistema nervioso central, tanto desde el punto de vista fisiológico como de las patologías que en él se originan. Las

neurociencias tienen hoy ante sí múltiples problemas que afectan a la sociedad en su conjunto: salud mental, drogadicción, enfermedades neurodegenerativas (Parkinson, Alzheimer, etcétera); por extraer un ejemplo, la enfermedad de Alzheimer, cuyas previsiones epidemiológicas para los próximos veinte años son realmente muy preocupantes, carece de tratamiento eficaz y se desconoce su etiología. Ello es así, a pesar de la producción científica mundial, que en los últimos años ha multiplicado el número de investigaciones relativas a esos temas; cuantificadas las citas en bancos de datos supone una producción diaria de 70 artículos. Pese a este evidente interés en los países avanzados, sólo muy recientemente se han organizado cursos de postgrado en neurociencias en algunas universidades españolas.

La neuroquímica es la parte de las neurociencias que trata de la estructura química del sistema nervioso, así como de la dinámica que se establece dentro del mismo para la consecución de los objetivos que debe cumplir: mantenimiento de las funciones biológicas vitales, respuesta a estímulos exteriores, regulación de los ciclos actividad-reposo, etcétera. La neuroquímica provee el sustrato básico sobre el cual interpretar los datos obtenidos en otras subdisciplinas. Sirva de ejemplo paradigmático la enfermedad de Parkinson: a partir de un hallazgo neuroquímico —alteración de la función neurotransmisora dopaminérgica en los enfermos— se pudo establecer una estrategia terapéutica inicial, basada en los conocimientos que entonces se poseían sobre la síntesis, liberación, localización, etcétera, del neurotransmisor implicado (dopamina). La neuroquímica, en definitiva, estudia aspectos básicos del funcionamiento del sistema nervioso central, con un énfasis especial en la sinapsis –puntos de contacto entre neuronas– por ser donde la manipulación farmacológica, con fines de estudio y también terapéuticos, es más sencilla y eficaz.

El libro de Bradford *Fundamentos de neuroquímica* constituye una de las escasísimas traducciones al castellano de textos sobre el tema existentes en la literatura mundial. El título inglés "Chemical Neurobiology: An Introduction to Neurochemistry" es quizá más revelador del contenido que el de la versión española, por cuanto ilustra el sustrato biológico –la neurona y su entorno– sobre el que van a girar todos los procesos neuroquímicos que se describen. Sea como fuere, el libro está bien traducido, con escasos fallos terminológicos, y los que hay son quizá producto de la escasa tradición sobre el tema en lengua castellana, apreciándose asimismo un esfuerzo por adaptar los términos ingleses en lugar de usar anglicismos, costumbre tan extendida en otros sectores de nuestra sociedad.

Por ser obra de un único autor, la profundidad de los temas tratados varía, aunque se advierte la voluntad de equilibrar la extensión de los distintos capítulos, dando un papel protagonista al estudio y descripción de los diversos neurotransmisores químicos y a los procesos de transducción de señal en las sinapsis. La obra consta de 9 capítulos, que a grandes rasgos podrían dividirse en cinco apartados: *1*) aspectos estructurales, en los que se describe el sustrato celular del sistema nervioso (neurona, glía, aspectos estructurales de la sinapsis, etc.); *2*) metabolismo energético del sistema nervioso, cuestión principal, por cuanto el cerebro depende del aporte sanguíneo de nutrientes y oxígeno; *3*) función neurotransmisora de diversos compuestos: aminas biógenas, aminoácidos excitadores e inhibidores, péptidos, etcétera. Esta parte constituye el núcleo central de la obra; *4*) modelos de estudio de los fenómenos sinápticos (liberación, transporte, metabolismo, etc.); *5*) participación de los neurotransmisores en funciones fisiológicas y sus alteraciones en diversas patologías que afectan al sistema nervioso.

El enfoque general de la obra huye de la mera descripción estática de los componentes celulares y químicos del sistema nervioso. Presenta una visión dinámica —real, en definitiva— de los procesos de neurotransmisión (regulación de la liberación, captación, fenómenos de plasticidad sináptica y otros). La obra representa un esfuerzo importante de recopilación bibliográfica.

Me gustaría que se hubiera entretenido en las técnicas que han hecho posible los conocimientos actuales en neuroquímica. La bondad de los descubrimientos científicos es función, en gran medida, de la fiabilidad de las técnicas que los hacen posibles. Por mi campo de trabajo me siento más inclinado a apreciar los ensayos de fijación de receptores, técnicas autorradiográficas, cromatografía líquida, microdiálisis *in vivo*, inmunocitoquímica. Quizás el origen de la obra –curso de neuroquímica para alumnos del Imperial College de Londres– haya condicionado el resultado final, no dejando lugar a aspectos metodológicos. Breve, quizá, el apartado sobre receptores de neurotransmisores, si consideramos su intervención en los procesos de transducción de la señal en la sinapsis y su manipulación farmacológica. El libro cubre en buena hora un vacío en la bibliografía castellana. Por sus distintos niveles de aproximación y lectura, resulta de provechosa utilidad a los alumnos, estudiantes de doctorado y profesionales de diversos campos (neurología, psiquiatría y disciplinas afines). El ingente aparato bibliográfico de cada capítulo permite profundizar, además, en todos los temas tratados. (F. A.)

MEDICINE, MIND, AND THE DOUBLE BRAIN. A STUDY IN NINETHEENTH-CENTURY THOUGHT, por Anne Harrington. Princeton University Press; Princeton, 1987.

El cerebro humano contiene unas 10^{12} neuronas, la mayoría de las cuales presentan más de 10.000 conexiones con otras células nerviosas. Ese increíble complejo de refinado orden constituye todo un reto intelectual. En un número reciente de *Science*, se seleccionaban los puntos principales de la neurología hoy, sus fronteras: guía del axón, guía del crecimiento de los conos, citomecánica neuronal, mecanismos moleculares y celulares de la drogodependencia, potenciación a largo plazo de la sinapsis, bases nerviosas del aprendizaje, neurofisiología del comportamiento y perspectivas de las ciencias cognitivas. Difícilmente podrían imaginarse Gall, Broca, Wernicke, Charcot o Hughlings-Jackson que su herencia fuera tan pródiga en avances o que sus toscas mediciones, fiadas todavía en el ojo clínico más o menos ayudado por el avance de la electricidad y el magnetismo, adquiriesen la precisión del angström (magnitud de la molécula), del micrometro (la sinapsis), las cien micras (la neurona), el milímetro (las redes) o ni siquiera el centímetro (los mapas).

Pero también es cierta la inversión del argumento: sin ellos y sin la teoría de la neurona de Cajal, no conoceríamos el espectacular despliegue de la neurología actual, a pesar de los vastos problemas de fondo que esperan solución. De esa primera parte nos habla Anne Harrington en su monografía de trescientas treinta y seis páginas apretadas, que constituyen un ejemplo valioso de lo que debe ser una historia conceptual de la ciencia, cuya necesidad reivindica. Si acaso le falta algo, sería una introducción más amplia donde expusiera las estructuras cerebrales con cierto detalle, laguna que el lector español colmará con una buena anatomía o con el resumen exacto que Bryan Kolb e Ian Q. Wishaw dan en el capítulo 1 ("Organización del sistema

nervioso") de sus *Fundamentos de neuropsicología humana;* ese capítulo le servirá también para completar los esquemas sumarios que Harrington ofrece en el apéndice de su obra.

Los nueve capítulos que componen el volumen pueden subsumirse en tres grandes apartados: antes de Broca, Broca y después de Broca. Lo que no quiere decir que el antropólogo francés sea el punto único de referencia, antes bien, el tema de fondo es el de la localización en el cerebro de las distintas funciones genuinamente humanas: habla, centros sensorio-motores, histeria, etcétera. Y hablando de localización, nada mejor que empezar por la sede del alma que Descartes puso en la glándula pineal, creyendo que se trataba de una estructura exclusiva de nuestra especie, apreciación totalmente errónea, pues no sólo la poseen muchos animales, sino que fue en éstos donde se descubrió en primer lugar.

La cartografía cerebral va asociada al nombre del austríaco Franz Joseph Gall, fundador de la frenología, cuyo principio básico afirma que la capacidad intelectual y los rasgos de la personalidad tienen su correlato anatómico en la morfología craneana, principio que se manifestaba en tres hipótesis de partida: el cerebro es el órgano de la mente; el cerebro consta de partes, cada una de las cuales sirve de soporte a una facultad distinta ("tono", "habla", "número", etcétera), y el tamaño de cada parte refleja la potencia de cada facultad. (A Gall se le debe también la distinción entre substancia gris y substancia blanca, amén de haber reconocido las fibras de las comisuras y establecido la decusación piramidal.) El enemigo más enconado de la frenología fue el fisiólogo francés Jean-Pierre-Marie Flourens. Su partidario español más destacado, Mariano Cubí; los *Elementos de frenología, fisonomía i magnetismo humano, en completa armonía con la espiritualidad, libertad e inmortalidad del alma* (Barcelona, 1849) popularizaron entre nosotros los mapas frenológicos. Harrington, que se ocupa del desarrollo de la neurología cerebral en Francia, Alemania, Inglaterra y Estados Unidos, omite toda referencia a España, capítulo éste abordado en varios estudios por el profesor Granjel y alguna incursión de Bujosa.

Paul Broca y Carl Wernicke han dejado sus nombres en sendas áreas cerebrales relacionadas con el lenguaje. El modelo de lateralización que contribuyeron a crear perduró hasta hace veinte años. En virtud del mismo, el

hemisferio izquierdo dominaría, y dentro de éste, sólo algunas zonas se hallarían implicadas en el lenguaje. No fue una intuición inmediata, sino que avanzó por peldaños, desde el reconocimiento de la asimetría de los hemisferios hasta el establecimiento de la superioridad del izquierdo, con ejemplos y contraejemplos, ayudado con los progresos en el esclarecimiento de las funciones motoras y sensoriales.

De todas las neurosis, que compartían un trastorno funcional sin base anatómica localizada, la histeria, la *grande nevrose*, planteaba un reto añadido: variaba en sus manifestaciones con la edad, sexo, estigmas o episodios críticos. Aunque Jean-Martin Charcot fue quien la estudió con especial ahínco, su liberación del útero y su extensión al varón se deben al libro de Paul Briquet *Traité de l'hystérie* (1859); esos datos y las investigaciones clínicas de los discípulos de Charcot, de Richer en particular, hizo que el tema de la histeria pareciera en muchos círculos una genuina obsesión "francesa".

Mayor universalidad alcanzaron los fenómenos de desdoblamiento de personalidad, mesmerismo, hipnosis y sugestión, en cuya descripción los médicos hicieron amplio uso de la física del magnetismo y de la electricidad. Recurso que contrasta, por otro lado, con la ausencia clamorosa de la medicina de laboratorio propiamente dicha, que se mantiene al margen. Justamente la situación opuesta que atraviesa hoy la neurología cerebral. Por su parte, la especulación psiquiátrica nace con el planteamiento de las relaciones mente-cerebro, que tiene su formulador primero en Hughlings-Jackson y se proyecta con la teoría del psicoanálisis de Freud. Son los capítulos séptimo y octavo de la obra. El noveno pasa revista a la suerte que vivió el estudio de los hemisferios en nuestra centuria.

Muchos son los aciertos del libro de Harrington. La elección del tema el primero. En ningún momento le viene ancho, por usar la expresión castellana que mejor caracteriza este esfuerzo tenso de ir desmadejando la complejidad intrínseca de escuelas, autores y teorías que se entrecruzan, rehacen, reformulan o corrigen. Otro hallazgo, la ponderada apreciación de cada hipótesis. Las páginas sobre el *corpus callosum*, por ejemplo, aparecen cuando el lector está pensando en esa estructura como elemento puente. Dicho de otra manera, logra que entremos, que nos entreguemos a su manera de ver las cosas. (L. A.)

Apuntes

La rizomanía es una enfermedad de la remolacha inducida por el virus de la amarillez necrótica de las venas de la planta. El virus se transmite a través de las zoosporas de un hongo del suelo (*Polymyxa betae* Keslin) y provoca pérdidas importantes en el peso de la raíz y en su contenido en azúcar. La infección persiste en el terreno durante más de 10 años. Desde 1985, cuando se detectó la enfermedad en España, se ha distribuido ya ampliamente por la Mancha y el valle del Duero.

La tectónica original y la paleohistoria de los oceanos constituyen sendos capítulos apenas hollados por la oceanografía. Pero empiezan a abrirse camino. Se supone que el nacimiento del oceano Indico fue como sigue. Hace 250 millones de años, en los albores del Mesozoico, la frontera occidental australiana limitaba con Gondwana septentrional, hasta cuya región norte llegaba el mar de Tethys. La transición del Tethys al oceano Indico actual se inició en el Jurásico tardío, abriéndose un inmenso hiato entre el noroeste australiano y una placa conjugada desconocida. Vino después la separación entre los tres subcontinentes que constituían Gondwana (India, Australia y Antártida) y, por último, la conexión del oceano Indico con el Atlántico Sur.

El genoma cloroplástico se parece bastante al genoma de los procariotas. Primero, en lo concerniente a la estructura y función de los genes; en segundo lugar, en lo relativo a la expresión de los genes, es decir, en las secuencias implicadas en el comienzo y el fin de la transcripción. Ambas clases de semejanzas abonan la teoría endosimbióntica de los cloroplastos, teoría según la cual estos orgánulos habrían evolucionado a partir de antepasados procariotas (cianobacterias, por ejemplo). Ahora bien, la presencia de intrones en ciertos genes cloroplásticos induce a pensar que, si esa teoría es correcta, los antepasados procariotas debían tenerlos y, por lo que se observa, los han perdido.

Sin olvidar el consejo de Nikolaas Tinbergen, premio Nobel que falleció en diciembre del año pasado, quien avisaba que un etólogo que se precie no debe aplicar sin más los resultados obtenidos con animales al hombre, es obvio que los estudios realizados con chimpancés, gorilas y otros primates despiertan especial interés. Por ejemplo, ¿qué significado evolutivo tiene que los testes del chimpancé cuadripliquen en peso los del gorila, siendo así que aquél apenas pesa la cuarta parte de éste? De acuerdo con la respuesta aceptada, las hembras de los chimpancés se aparean con más de un macho, lo que no ocurre con las hembras del gorila, e interviene, pues, el proceso de selección. Las nuevas hipótesis priman, sin embargo, la formación de líquido espermático al que ligan con el éxito reproductor.

Una de las cirugías más avanzadas del mundo, la japonesa, confía en que el Consejo de Bioética de la Asociación Médica Colegial resuelva que la muerte cerebral equivalga a la definición de muerte. El profundo respeto por el cuerpo, enraizado en el pensamiento oriental, asocia cualquier extracción de órganos vivos para su trasplante a la categoría de asesinato. La mayoría de los países donde existen consejos bioéticos aceptan el criterio de muerte cerebral como muerte del paciente y rechazan extender la muerte cerebral a la pérdida de las funciones cerebrales superiores.

La situación de normalidad en el desarrollo de una disciplina científica se caracteriza por avances lentos y firmes que van consolidando la ciencia en cuestión. Eso parece ocurrir en topología del ADN, campo donde físicos, matemáticos, químicos y cristalógrafos parecen haberle quitado la palabra a los biólogos. El abecé de esa disciplina son las distintas configuraciones que ofrece el ADN cristalizado: hélice A, hélice B o hélice Z. Pertenece también a ese puñado de hipótesis fundamentales la afirmación de que un fragmento de una secuencia dada sólo podía cristalizar en una de las tres formas aducidas; pero si las simulaciones de ordenador responden a la realidad podremos admitir que se dan, juntas, la forma A y la B.

Desde hace más de cien años se conoce la función de las papilas gustativas, pero apenas se ha avanzado en la fisiología de las células del gusto o en los mecanismos moleculares implicados en los procesos de transmisión de ese tipo de sensaciones. Gracias a ese sentido, los animales distinguen los alimentos convenientes de los tóxicos, porque suele coincidir que la mayoría de los alcaloides vegetales venenosos son asimismo intensamente amargos. Según parece, la transmisión de la sensación gustativa se produce en virtud de un mecanismo de los llamados receptor-segundo mensajero que provoca la liberación de neurotransmisores.